Ю. Г. МИЗУН

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Серия «Человек и окружающая среда»

Ю. Г. МИЗУН

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1983

М—57 Мизун Ю. Г. Полярные сияния. М.: Наука, 1983. 136 с.

В книге рассказано об одном из интереснейших явлений природы — полярных сияниях. Автор рассматривает причины их возникновения, связи с солнечной активностью, ближним и дальним космосом, влияние полярных сияний на жизнь и деятельность людей в высоких широтах. Использованы результаты исследований, проведенных в последнее время с помощью геофизических ракет и искусственных спутников Земли.

Для широкого круга читателей, интересующихся необычными явлениями природы.

Ответственный редактор
доктор физико-математических наук
М. И. ПУДОВКИН

М $\frac{1704000000\text{-}318}{042(02)\text{-}83}$ 145-83—III

ОТ АВТОРА

Полярные сияния представляют собой одно из самых впечатляющих, грандиозных и красивых явлений природы. Человек невооруженным глазом может наблюдать взаимодействие потоков заряженных частиц, приходящих от Солнца, с атмосферой Земли на высотах 100—1000 км, в результате которого и происходит свечение основных газов атмосферы — кислорода, азота, водорода.

За последние десятилетия исследователи околоземного космического пространства получили в свое распоряжение мощный исследовательский инструмент — искусственные спутники Земли (ИСЗ) и геофизические ракеты. Это позволило получить огромный экспериментальный материал об излучении Солнца, строении магнитосферы Земли, условиях в высоких слоях земной атмосферы. Этот материал позволил существенно продвинуться в понимании характера солнечно-земных связей и природы полярных сияний.

В данной книге в доступной неспециалистам форме рассказывается о магнитосфере Земли, солнечном излучении, верхней атмосфере Земли и, главное, о полярных сияниях. Прослеживается взаимосвязь процессов в околоземном космическом пространстве, а также их связь с процессами на Солнце и в межпланетной среде.

Под давлением экспериментальных данных таинственность и загадочность полярных сияний постепенно отступает. Но интерес к ним остается. Более того, кажется, что в настоящее время мы нащупали только контуры предмета (хотя, конечно, успехи в изучении полярных сияний на сегодняшний день очень велики), а проработка всех тонкостей и деталей впереди.

ВВЕДЕНИЕ

Человек не мог не заметить полярные сияния, когда они появлялись на небе. Поэтому можно уверенно сказать, что полярные сияния он обнаружил с самой глубокой древности. Полярные сияния в средних и низких широтах наблюдаются очень редко (только при чрезвычайно сильных возмущениях на Солнце, в периоды максимальной его активности).

Письменные упоминания о полярных сияниях встречаются у Аристотеля, Плиния, Сенеки и других греческих и римских философов, живших на берегах Средиземного моря.

В средние века полярные сияния считались предвестниками войн, голода, эпидемий, других больших катастроф. Запомнилось, что как перед падением Иерусалима, так и перед смертью Юлия Цезаря наблюдались вспышки полярных сияний. Все это считалось проявлением гнева богов или другого знамения. В это время в полярных сияниях видели нечто сверхъестественное. Иногда их изображали даже в виде целых армий, вооруженных пиками и сражающихся насмерть.

Население тех мест, где часто наблюдались полярные сияния, т. е. в северных широтах, имело более реалистическое представление об этом явлении. Кое-кто даже пытался естественным путем объяснить происхождение полярных сияний, считая их солнечными лучами, накопившимися в толще льда в течение дня и излучаемыми ночью, или отражением солнечного света от северных морей.

На Руси полярные сияния называли пазорями или сполохами. Слово «пазори» означает «зореподобные», а «сполохи» родственно слову «полошить», т. е. бить в набат. Во время полярных сияний действительно часто приходилось бить в набат. Это отмечалось и в других странах. Так, по свидетельству Сенеки, в 37 г. н. э. «пожар на небе» был таким красным, что люди решили: «горит вся колония Остия». На помощь ее населению император Тиберий послал даже своих солдат.

Подобные случаи имели место и в более позднее время. Так, 25 января 1938 г., когда солнечная активность была максимальной и полярные сияния достигали Европы, пожарные команды некоторых городов Европы направились к громадному зареву в северной части горизонта.

Говоря об истории полярных сияний, нельзя не упомянуть Антония де Уллоа, который во время своего путешествия вокруг мыса Горн в 1745 г. много раз видел полярные сияния в южном полушарии. Кук также наблюдал полярные сияния в южном полушарии, которые совпали по времени с полярными сияниями в северном полушарии (в Европе). Это первые данные о том, что полярные сияния наблюдаются одновременно в обоих полушариях.

Объяснений причины полярного сияния было предложено очень много. Были среди них и очень наивные (вроде того, что это свечение гнилой рыбы, выброшенной на берег разбушевавшимся северным морем), и весьма прозорливые. Так, француз Ж.-Д. Мейран в середине XVIII в. предполагал, что сияния возникают тогда, когда «материя зодиакального света» попадает в атмосферу, а Э. Галлей считал, что появление полярных сияний связано со «светящейся магнитной жидкостью». Последнее предположение очень близко к истине.

М. В. Ломоносов также серьезно интересовался проблемой полярных сияний. Он писал: «Весьма вероятно, что северные сияния рождаются от происшедшей на воздухе электрической силы. Подтверждается сие подобием явления и исчезновения, движения, цвету и виду, которые в северном сиянии и в электрическом свете третьего рода показываются». Подобного мнения были Ж. Кэнтон в Англии и Б. Франклин в Америке.

Полярное сияние — самое грандиозное явление, которое человек может наблюдать на Земле. Невооруженным глазом видно свечение атмосферы на высотах в сотни и на удалениях в тысячи километров. Свечение настолько разноцветно и динамично, что производит впечатление чего-то живого, движущегося, дышащего. Даже после 20 лет наблюдения полярных сияний это впечатление не пропадает. Привыкнуть к картине полярных сияний невозможно, каждый раз оно воспринимается как что-то новое, иное, чем вчера, более завлекающее. Недаром считают, что полярные сияния принадлежат к наиболее красивым явлениям природы.

Но полярное сияние не только грандиозное и красивое зрелище. Оно является и единственным проявлением воздействия солнечной корпускулярной радиации на околоземное космическое пространство и земную атмосферу, которое на больших пространствах можно видеть невооруженным глазом.

Полярное сияние — это свечение земной атмосферы под действием потоков электронов и протонов, которые вторгаются в верхнюю атмосферу. Первоисточником этих заряженных частиц является Солнце. Солнечные корпускулярные потоки, подходя к Земле, обтекают ее, поскольку Земля экранирована от заряженных частиц своим магнитным полем — магнитосферой. Однако конфигурация магнитосферы такова, что часть этих частиц проникает внутрь магнитосферы, а затем, трансформируясь, и в верхнюю атмосферу. Здесь под действием электронов и протонов происходит ионизация нейтральных атмосферных газов (кислорода и азота), а также возбуждение их атомов и молекул. Это и является причиной свечения атомов и молекул кислорода, азота, водорода и других атмосферных газов.

Полярные сияния, которые вызываются электронами, по своим свойствам отличаются от сияний, вызываемых протонами. Если измерить характеристики излучения (длину волны, интенсивность), то можно сделать заключение о том, какие атомы или молекулы излучили эти волны, а также какими заряженными частицами (с какими энергиями) было вызвано возбуждение излучающих атомов и молекул.

Полярные сияния отличаются по форме, цвету (т. е. длине волны излучения), интенсивности свечения, высоте над поверхностью Земли и другим характеристикам. Дело в том, что они зависят от многих изменчивых факторов. Это прежде всего потоки заряженных частиц — электронов и протонов, которые зависят от солнечной активности, широты и долготы данного места, времени суток, сезона и др. Потоки заряженных частиц характеризуются энергией, энергетическим спектром и интенсивностью. Поскольку заряженные частицы взаимодействуют с магнитным полем, то важным представляется и распределение скоростей заряженных частиц относительно направления магнитной силовой линии. Это так называемое распределение заряженных частиц по питч-углам (это угол между направлением скорости частицы и направлением магнитной силовой

линии). От характеристик потоков заряженных частиц, и прежде всего от конфигурации магнитосферы, зависит, в какие области земной атмосферы эти частицы смогут вторгаться. Другими словами, в каких местах на земной поверхности будут наблюдаться полярные сияния.

Это один из основных вопросов, касающихся полярных сияний, и мы его рассмотрим весьма подробно. Здесь только укажем, что имеются две области в земной атмосфере, куда эти частицы проникают наиболее часто. Эти области представляют собой два овала (в северном и южном полушариях), удаленные от геомагнитных полюсов ночью приблизительно на 20°, а днем на 10°. Протяженность этих овальных областей по широте составляет всего несколько градусов (т. е. несколько сот километров). В областях, окруженных этими овалами, т. е. в полярных шапках, полярные сияния наблюдаются реже, чем в овалах полярных сияний, а в периоды сильных возмущений, когда сияния в овалах наиболее интенсивны, в полярных шапках они исчезают вовсе.

Таким образом, полярные сияния наблюдаются в высоких широтах северного и южного полушарий. Поэтому их еще называют северными и южными сияниями. В настоящее время в научной литературе широко распространен термин «аврора» (полярное сияние), авроральный овал (овал полярных сияний), авроральные явления и др. Термин «аврора» пришел к нам от древних римлян, которые называли редкие для них полярные сияния красновато-розового цвета именем богини утренней зари Авроры.

Важным фактором, который определяет свойства полярных сияний, является химический состав верхней атмосферы и ее физические свойства (зависимость плотности каждой составляющей атмосферы от высоты, температуры, движения и др.). Атомы и молекулы, а также их ионы, способные возбуждаться при столкновениях с частицами вторгающегося в атмосферу потока, поглощают при возбуждении определенные порции энергии частиц (это так называемые строго определенные потенциалы возбуждения). Этими величинами энергии определяются и эмиссии (излучения) этих атомов и молекул, их длина волны и интенсивность.

Если бы земная атмосфера имела другой химический состав, то и полярные сияния наблюдались бы в других линиях. Благоприятные условия для сияния зависят от того, какова энергия воздействующего электрона или про-

тона имеется в момент взаимодействия и эффективность этого взаимодействия для данного процесса.

Из сказанного ясно, что проблема полярных сияний относится к проблемам солнечно-земной физики. Видимое, оптическое излучение атмосферы, которое собственно и называется сиянием, является только одной из сторон сложного, но единого физического процесса, связанного с выбросом плазмы из Солнца, приходом этой плазмы к орбите Земли, взаимодействием ее с магнитосферой, которая при этом деформируется, проникновением этой плазмы в околоземное космическое пространство (внутрь магнитосферы), ускорением заряженных частиц в магнитосфере и, наконец, их вторжением в верхнюю атмосферу Земли. С момента вторжения заряженных частиц (электронов и протонов) в атмосферу Земли начинается целый комплекс процессов, включающих ионизацию атомов и молекул, их возбуждение, свечение их в определенных линиях и т. д.

Многие десятилетия полярные сияния исследовались в поверхности Земли. Только последнее время для этих целей стало возможным использование ракет, ИСЗ и высотных самолетов. В самом начале собирались факты о времени сияния, их месте и движениях. Затем стали возможны измерения высот полярных сияний при одновременном их наблюдении из нескольких пунктов на земной поверхности (триангуляционный метод). В дальнейшем стало возможным фотографирование полярных сияний, что положило начало накоплению фактического материала об этом природном явлении. Возможность фотографирования позволила более точно определять высоты сияния по их взаимному расположению относительно изображения на фотографиях из разных пунктов звезд. Полярные сияния очень изменчивы и динамичны. Поэтому применяемая в первых измерениях большая экспозиция при фотографировании не позволяла получить информацию о быстро меняющихся сияниях.

С одной стороны, изучались формы полярных сияний, их изменчивость, движения, условия их возникновения и исчезновения, а также зависимость от времени суток, сезона, солнечной и магнитной активности, широты и др. С другой — исследовалось излучение в отдельных линиях, делались попытки отождествить излучение в отдельных спектральных линиях с определенными переходами возбужденных атомов и молекул и их ионов. Так по харак-

теру излучения верхней атмосферы был определен ее химический состав задолго до того, как стали возможными прямые измерения состава атмосферы с помощью ракет и ИСЗ. Этот источник информации о составе верхней атмосферы не потерял своего значения и в настоящее время, поскольку он позволяет получать более непрерывные и систематические данные.

Первые наблюдения излучения в определенных линиях (эмиссиях) выполнялись при помощи спектрографов. Эти измерения требовали длительных экспозиций и поэтому не давали необходимых разрешений в пространстве и времени. Применение фотометрических методов позволило производить значительно более ценные наблюдения.

Затем стали применяться спектрофотометры. Спектрофотометры, сканирующие в ограниченной области спектра, значительно превосходят спектрографы и широко используются при изучении полярных сияний.

Исследование спектров полярных сияний дало возможность получить ценную информацию не только о составе верхней атмосферы, но и о свойствах потоков заряженных частиц (электронов и протонов), которые вызывают полярные сияния. Для этого исследовалась интенсивность эмиссии в отдельных линиях, отношение интенсивностей в определенных линиях, их высотное распределение и зависимость от широты. Эти измерения достаточно сложны из-за того, что прибор суммирует все свечения, попадающие в его поле зрения, и трудно достичь большой точности в измерениях интенсивности эмиссии в отдельных линиях, а тем более с точной привязкой к высоте. Тем не менее полученный экспериментальный материал позволяет делать выводы о характеристиках вторгающихся электронов и протонов. Эти данные не потеряли своей актуальности и сейчас, когда стали возможны прямые измерения потоков заряженных частиц с помощью приборов, установленных на ракетах и спутниках.

Измеряя спектры полярных сияний, можно определить не только состав атмосферы и свойства потоков вторгающихся заряженных частиц, но и температуру в атмосфере.

Во время вторжения в верхнюю атмосферу потоков заряженных частиц наряду с полярными сияниями происходит целый ряд других процессов и явлений, с которыми полярные сияния тесно связаны. То, что сияния усиливаются и число их возрастает с увеличением солнечной и магнитной активности, понятно: усиление активности озна-

чает усиление потоков заряженных частиц. Вторгающиеся частицы наряду с возбуждением атомов и молекул (и их ионов) производят и ионизацию. В высоких широтах в зонах вторжения этих частиц создаются целые слои ионизованных атомов и молекул и свободных электронов. Так, в зонах, где чаще всего наблюдаются полярные сияния, за счет ионизации потоками электронов на высотах около 100 км создается целый слой свободных электронов толщиной ~5–15 км с плотностью электронов 10^6 $см^{-3}$. Это так называемый спорадический ионосферный слой E_s. Его возникновение и величина концентрации электронов тесно связаны с появлением и интенсивностью полярных сияний в овалах полярных сияний.

Вторжение высокоэнергичных солнечных протонов (солнечных космических лучей) с энергиями 1–100 мэВ в полярные шапки вызывает образование ионизации на более низких высотах (50–80 км). Эта ионизация в области D ионосферы является причиной поглощения радиоволн коротковолнового диапазона, которое называется поглощением типа полярной шапки (ППШ). Во время ППШ также наблюдаются полярные сияния определенного типа и определенной формы (мантийные полярные сияния), которые очень тесно связаны с этим слоем ионосферы.

Таким образом, полярные сияния очень тесно связаны с полярной ионосферой. Такая же тесная связь имеется между полярными сияниями и магнитными возмущениями. Дело в том, что часть изменений магнитного поля во время магнитных бурь происходит за счет возникновения электрических токов в ионосфере на высоте около 100 км. Образование электрического тока зависит от двух причин: наличия электрического поля и достаточной проводимости ионосферы. Проводимость ионосферы определяется количеством свободных электронов, а они в свою очередь создаются ионизацией потоками заряженных частиц. Таким образом, эта связь полярных сияний с магнитными возмущениями также физически понятна. Пульсирующие полярные сияния, интенсивность которых изменяется с частотой в несколько герц, очень тесно связаны с пульсациями в магнитном поле Земли.

Тесно связаны полярные сияния и с другими явлениями, например с отражением радиоволн КВ и УКВ диапазона от ионосферных (авроральных) неоднородностей. Недаром эти радиоотражения, регистрируемые радиолокаторами, называются также радиосияниями.

Таким образом, для того чтобы осветить проблему полярных сияний, необходимо рассмотреть условия и закономерности выброса потоков заряженных частиц (электронов и протонов) из Солнца, их зависимость от 11-летнего цикла солнечной активности и 27-дневного периода обращения Солнца. Кроме того, надо рассмотреть строение магнитосферы Земли и изменение ее при воздействии солнечных потоков плазмы, а также процессы в магнитосфере и ионосфере Земли во время магнитосферной бури. После рассмотрения этих вопросов многие аспекты проблемы полярных сияний становятся понятными и экспериментальные данные хорошо укладываются в общую картину солнечно-земного взаимодействия.

СОЛНЦЕ И СОЛНЕЧНЫЕ БУРИ

Полярные сияния — одно из проявлений солнечно-земного взаимодействия, т. е. солнечно-земной физики. Они возникают в результате вторжения в верхнюю атмосферу высоких широт потоков заряженных частиц, первопричиной которых является Солнце. Приведем здесь по возможности кратко необходимые для данной проблемы сведения о процессах на Солнце, которые связаны с выбросом из него геоэффективной плазмы.

Вначале несколько количественных характеристик. Масса Солнца содержит вещества приблизительно в 332 000 раз больше, чем Земля. Объем Солнца в 109^3 раз больше объема Земли. Средняя плотность Солнца составляет 0,256 плотности Земли или 1,4 плотности воды. Сила тяготения на Солнце в 28 раз больше земной. Низкая средняя плотность Солнца и одновременно такая большая сила тяготения определяют характер процессов внутри Солнца. Среднее расстояние до Солнца составляет 149 500 000 км с точностью до 16 000 км. Луч света преодолевает это расстояние за 8,3 мин, а ракете потребовалось бы около 10 лет. Заряженные частицы, выбрасываемые из Солнца и затем действующие на магнитосферу Земли, проходят расстояние Солнце—Земля за полтора суток. Расстояние между Солнцем и Землей меняется в течение года приблизительно на $4{,}8 \cdot 10^6$ км. Это обусловлено эксцентриситетом земной орбиты. Это расстояние наименьшее, когда Земля находится в перигелии, т. е. в начале января, и наибольшее в начале июля, когда она находится в афелии. Вследствие этого

солнечное излучение, достигающее Земли, меняется в течение года на 7%.

Вещество Солнца в значительной мере состоит из тех же химических элементов, которые имеются на Земле. Температура внутри Солнца так высока, что оно является раскаленным газовым шаром.

Солнце имеет слоистую структуру. В самой внутренней его части температура составляет около 20 млн. градусов (скорости движения атомов между столкновениями равны около 200 км/с). Атомы здесь главным образом лишены электронной оболочки, т. е. многократно ионизованы. Естественно, что эти свободные электроны также входят в состав солнечного вещества. При таких больших температурах там имеется излучение огромной плотности в виде рентгеновских лучей или γ-лучей, которые несут большую энергию. Там происходят термоядерные реакции, при которых определенная доля массы ядер переходит в γ-излучение.

На любом расстоянии от центра Солнца должно соблюдаться равновесие между противоположно направленными силами, а именно гравитационным тяготением, которое направлено к центру Солнца, и давлением потока излучения, которое направлено от центра к поверхности. По мере продвижения из глубины Солнца к его поверхности энергия γ-излучения постепенно уменьшается (происходит бесчисленное число актов поглощения и переизлучения их другими атомами), а само излучение отмечается на большей длине волны. Вначале это излучение проявляется как рентгеновские лучи, затем на другом уровне как ультрафиолетовое излучение и т. д. На поверхности Солнца большая часть излучения — это видимый свет.

Чем же характерны отдельные слои Солнца? На удалении около 700 000 км от центра находится фотосфера Солнца. Здесь солнечный газ становится прозрачным. При наблюдении за Солнцем извне фотосфера и есть тот наиболее глубокий уровень, который доступен наблюдению. От фотосферы Солнца Земля получает большую часть света и тепла. Температура фотосферы равна 6000 К.

Спектр излучения фотосферы непрерывен со всеми видимыми длинами волн, ее толщина 100—200 км. На уровне фотосферы наблюдаются солнечные пятна, которые имеют самое непосредственное отношение к рассматриваемой нами проблеме. К ним мы вернемся позже.

Выше над фотосферой расположен так называемый обращающий слой толщиной около 100 км. Здесь многие атомы или нейтральны, или однократно ионизованы. Под действием излучения атомы возбуждаются и затем, переходя обратно в основное состояние, излучают. Излучение происходит в любом направлении независимо от направления поглощенных лучей. Поэтому в непрерывном спектре фотосферы возникают узкие линии поглощения (фраунгоферовы линии).

Выше обращающего слоя располагается хромосфера Солнца. Она является как кольцо красного цвета в периоды полного затмения, когда перекрывается свет фотосферы. Красный цвет хромосферы обусловлен излучением на длине волны 6563 Å водорода, из которого она состоит.

Спектр обращающего слоя и хромосферы — это линии излучения различных длин волн. Большая часть этих линий образуется теми же самыми атомами, которые создают фраунгоферов спектр. Верхняя граница хромосферы отмечается на 14 000 км, где линии ионизованного кальция перестают быть видимыми.

Температура хромосферы достигает 30 000 К.

Выше хромосферы находится корона Солнца. Она видна невооруженным глазом только во время полных затмений. Это гало белого цвета на фоне хромосферы красного цвета, а также протуберанцев, которые в виде лепестков и лучей простираются на расстояния в несколько солнечных диаметров. Температура короны достигает 1 000 000 К.

Рассмотрим подробнее протуберанцы. Они выходят за пределы хромосферы и проникают далеко в корону. Это светящиеся облака паров. Свет их представляет собой линии излучения водорода, гелия и ионизованного кальция. Температура протуберанцев колеблется в пределах 10 000–20 000 К.

Солнечная активность. Для солнечно-земной физики фундаментальным вопросом является активность Солнца. Именно она определяет степень возмущенности магнитосферы, частоту бурь, их интенсивность и, естественно, закономерности появления полярных сияний.

Основные области, с которыми связывают проблему солнечной активности,— это солнечные пятна. Но даже тогда, когда пятна на поверхности Солнца не видны, эта поверхность имеет тонкую структуру. Ее сравнивали с «рисовыми

зернами» или «листьями ивы» и т. п. Неоднородность солнечной поверхности обозначается термином «грануляция». Поверхностная яркость гранулы может на 10% превышать яркость окружающего фона. Гранулы возникают и исчезают непрерывно, чем-то напоминая кипение.

Между гранулами иногда образуются пóры (темные области). Из нескольких объединенных друг с другом пор образуются солнечные пятна, которые чаще всего появляются парами в виде ведущего (головного) и замыкающего (хвостового) пятен. Головное пятно является западным, поскольку Солнце вращается вокруг своей оси с востока на запад.

Вначале после возникновения размер пятен увеличивается и два головных пятна быстро расходятся по долготе и спустя десять дней отстоят друг от друга на расстоянии 10—15° Первым распадается хвостовое пятно, тогда как головное живет в четыре раза дольше. Время жизни пятен весьма различно — от нескольких часов до нескольких месяцев.

Солнечное пятно состоит из ядра (тени) и окружающей ядро полутени. Ядро занимает около $^1/_5$ всей площади пятна. Относительное число солнечных пятен R принято как мера солнечной активности. Подсчет ведется по формуле

$$R=k(10g+f),$$

где g — число возмущенных областей (в которое входит число групп пятен, а также отдельные изолированные пятна), f — общее число пятен независимо от того, находятся ли они в группах или нет. Постоянная k определяется инструментом наблюдения. Применительно к цюрихскому телескопу с отверстием 8 см и увеличением 64 величина $k=1$. Эта методика принята в Цюрихской обсерватории, в которую поступают и данные многих обсерваторий мира.

Методика расчета, принятая на Гринвичской обсерватории, основана на измерении полной площади солнечных пятен по фотографиям. Сопоставление обеих характеристик показывает, что они изменяются со временем достаточно синхронно. На основании анализа солнечных данных начиная с 1749 г. было показано, что средний период между двумя последовательными максимумами солнечной активности составляет 11,1 года. При этом отдельные периоды имели продолжительность 7, а некоторые 17 лет. Максимумы солнечной активности также отличаются один

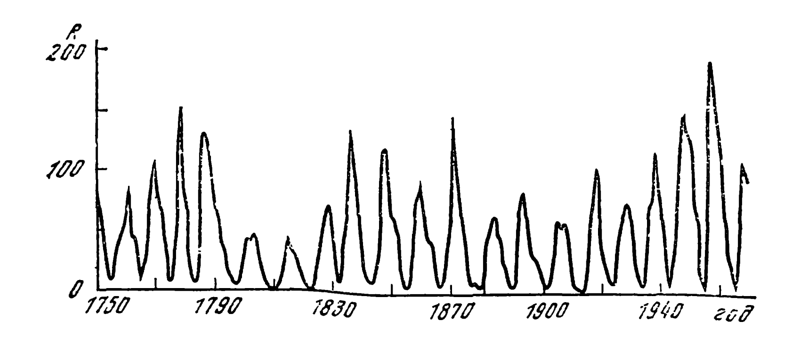


Рис. 1. Изменение среднегодовых чисел солнечных пятен с 1750 г.

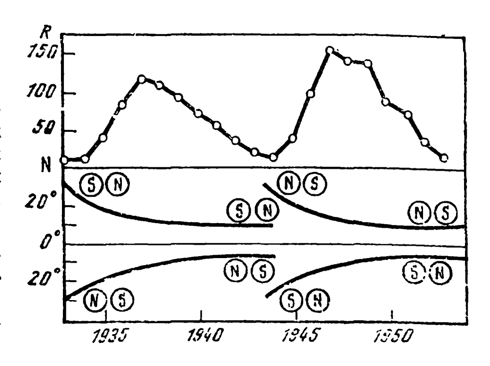


Рис. 2. Изменение среднегодовых чисел солнечных пятен *R* и приближенных средних широт солнечных пятен (закон Шперера) за 1933—1953 гг.

Буквами в кружках обозначены полярности биполярных солнечных пятен (закон полярности солнечных пятен)

от другого. Так, в максимумы 1870 и 1974 гг. солнечных пятен было в три раза больше, чем в 1816 г.— в период самого низкого максимума. В 1957—1958 гг. максимум солнечной активности был еще больше (рис. 1).

Представляет научный и практический интерес распределение солнечных пятен по широте. Установлено, что с изменением числа солнечных пятен в течение 11-летнего цикла солнечной активности постепенно изменяется и средняя широта, на которой появляются пятна (рис. 2). Видно, что в начале каждого цикла, когда число появляющихся пятен растет от минимума к максимуму, новые солнечные пятна расположены в поясе широт ±30°. Затем они возникают все ближе к солнечному экватору и в период максимума их средняя широта составляет ±16°, а при следующем максимуме даже ±8° Вблизи минимума солнечной активности пятна старого и нового циклов наблюдаются одновременно: первого — на низких широтах, второго — в высоких. Это закон Шперера.

Долгоживущие пятна могут наблюдаться несколько раз, т. е. в течение нескольких периодов вращения Солнца. Пятно вблизи экватора возвращается к своей исходной точке в среднем через 25,0 дня, а на широте ±30° — через 26,2 дня. Это сидерический (истинный) период вращения. Но поскольку Земля должна «догонять» Солнце (Солнце вращается в том же направлении, в каком Земля обращается вокруг него), то для наблюдателя, находящегося на Земле, это время удлиняется. Оно равно 26,9 дня, если пятно находится на солнечном экваторе, и 28,3 дня — на широте ±30° Это синодические периоды вращения. Период вращения изменяется с широтой по той причине, что Солнце — газообразное тело.

Как правило, группа солнечных пятен окружена факельными полями. В этих областях фотосфера несколько ярче, чем в остальных местах, видных в белом свете. Факелы состоят из ярких полосок, прожилок и неправильных лоскутков. В таких факельных полях появляются и активные протуберанцы, которые связаны с солнечными пятнами, а также вспышки и возбуждаемые области в короне. Факелы возникают незадолго до образования солнечного пятна и продолжают существовать и после исчезновения пятна. Время их жизни в три раза больше времени жизни пятна. Считается, что факелы — это те области, где турбулентность и конвекция поднимают нагретые газы более глубоких уровней вверх.

На широтах выше ±40° солнечные пятна встречаются исключительно редко. Однако факелы наблюдаются даже на широтах 60—80° Правда эти факелы несколько иного вида. Они малы, имеют вид ярких крапинок диаметром 5000—10 000 км, время их жизни непродолжительно. Эти факелы (полярные) чаще всего встречаются в периоды, близкие к минимуму солнечной активности.

Важной характеристикой солнечного пятна является его магнитное поле. Его наличие было подтверждено путем измерения эффекта Зеемана, по которому одиночные спектральные линии многих элементов расщепляются на две или более линии, когда излучаются в магнитном поле. Измерение эффекта Зеемана позволяет по расстоянию между компонентами определить величину напряженности поля. Кроме того, изменение магнитного поля на обратное меняет поляризацию излучаемой волны. Поэтому с помощью спектрографа можно различать северную и южную поляр-

ность магнитного поля. Величина магнитного поля в большом солнечном пятне составляет около 3000 Гс.

Для большинства больших солнечных пятен характерно биполярное магнитное поле, т. е. когда одно пятно пары имеет северную полярность, а другое — южную. Как правило, головное пятно в северном полушарии Солнца южной полярности, а хвостовое — северной. В южном полушарии — наоборот. В следующем солнечном цикле все обращается. Поэтому если требовать от всех основных параметров повторения из цикла в цикл, то следовало бы принять цикл равным не 11 лет, а 22 года; повторение направления магнитного поля солнечных пятен происходит только через 22 года.

Эффективная температура солнечного пятна составляет около 4500 К, тогда как соседняя фотосфера имеет 6000 К. Таким образом, в области солнечного пятна работает какой-то физический механизм, способный поддерживать на большой площади такой перепад температуры (более чем на 1000 К).

Глубина солнечного пятна порядка 10 000 км. В центре пятна конвективные потоки гораздо сильнее, поэтому газы растекаются радиально через вершину «кратера» солнечного пятна. Скорость этого растекания составляет порядка 2 км/с. Непосредственным следствием этого эффекта является охлаждение пятна. Вещество, поднимаемое вверх против силы тяготения, увеличивает свою потенциальную энергию, и этот прирост берется из запаса тепловой энергии.

Солнечные вспышки. В центрах активности время от времени происходят солнечные бури, когда за относительно короткое время преобразуется большое количество энергии. Во время солнечной бури наблюдается внезапное увеличение яркости излучения в линии H_α, которое называется солнечной вспышкой. При солнечной вспышке часть солнечной атмосферы площадью 25 млрд. км^2 (площадь большого солнечного пятна) в десятки раз увеличивает свою яркость в свете водородной линии. Максимум свечения вспышки достигается через 5—10 мин после ее возникновения. Вспышки всегда образуются в областях ярких водородных флоккулов, которые связаны с солнечными пятнами. На удалениях больше 10^5 км от солнечного пятна вспышки наблюдаются редко.

Излучение вспышки происходит главным образом в отдельных спектральных линиях. Это — линии водорода H_α (6563 Å), H_β (4861 Å) и другие линии серии Бальмера. С линией H_α сравнимы по интенсивности линии H^+ (3968 Å) и K^+ (3934 Å) однажды ионизованного кальция. Имеются также линии нейтрального гелия, ионизованного железа и ряда атомов других металлов, которые обнаружены в хромосфере. Но интенсивности этих излучений меньше.

Наблюдаются также интенсивные рентгеновское, ультрафиолетовое и радиоизлучение. В некоторых случаях увеличивается и яркость белого света над всей областью вспышки. До больших высот в корону выбрасываются облака плазмы, часть которых распространяется даже за пределы земной орбиты.

Полная мощность энергии, излучаемой в линии H_α, может достигать 10^{26} эрг/с в максимуме.

В зависимости от площади области, излучающей в линии H_α, различают пять классов вспышек. Они обозначаются: S (субвспышки), 1, 2, 3, 4. К этим цифрам присоединяются вспомогательные индексы f, n, b для указания слабой, нормальной и яркой вспышек соответственно. Во время Международного геофизического года (МГГ) (1957—1958 гг.), который был периодом исключительно высокой активности Солнца, произошло около 6656 вспышек.

Солнечные вспышки связаны с двумя типами рентгеновского излучения. Первый — это «мягкая» тепловая компонента, обусловленная атомными переходами. Генерируемое рентгеновское излучение в интервале длин волн от 1 до 100 Å (диапазон энергий от 124 эВ до 12,4 кэВ). Второй тип — «жесткое» рентгеновское излучение с энергиями от 10 кэВ до 1 МэВ и длиной волн 0,0124—1,24 Å. Это тормозное излучение, которое вызывается столкновениями нетепловых электронов с окружающими ядрами.

Всплески рентгеновского излучения производят увеличение ионизации в нижней ионосфере Земли (слой D), так называемые внезапные ионосферные возмущения (SID) и др. Возмущенные области излучают также радиоволны. Имеется пять типов таких волн (I—V). Это радиоизлучение генерируется заряженными частицами, которые ускоряются в области вспышки. В самой ранней стадии вспышки электроны становятся высокоэнергичными. Они движутся вверх вдоль магнитных силовых линий солнечного пятна и взаимодействуют с плазмой солнечной короны, заставляя ее колебаться и излучать на определенной частоте.

Колебания плазмы наблюдаются на Земле в виде коротких всплесков радиоизлучения типа III.

Релятивистские электроны движутся по спирали вокруг силовых линий солнечного пятна и излучают синхротронное излучение, которое наблюдается как всплески радиоизлучения типа V во время начальной фазы вспышки. Некоторые из этих электронов движутся вниз и сталкиваются с ядрами водорода, в результате чего возникают всплески тормозного рентгеновского излучения. Между радиоизлучением в сантиметровом диапазоне и вспышками рентгеновского излучения имеется тесная связь.

Наиболее интересным для проблемы солнечно-земной физики является радиоизлучение типа IV. Обычно оно продолжается в течение нескольких часов после прекращения оптической вспышки.

Кроме электромагнитного излучения, во время второй фазы хромосферной вспышки происходит выброс солнечных частиц, которые обладают энергиями от 1 кэВ до 15 ГэВ (для протонов). Это солнечные космические лучи с энергией от 100 кэВ до 100 МэВ и облака плазмы, в которых протоны имеют энергию порядка 0,5—1,5 кэВ.

Первые два типа частиц (протоны и небольшое количество тяжелых ядер) образуются в результате процессов ускорения во время самой ранней стадии вспышки. Эти частицы доходят до орбиты Земли, которая в результате окружается протонами высокой энергии. Эти высокоэнергичные заряженные частицы почти не влияют на межпланетное и геомагнитное поле: плотность энергии их слишком мала.

Иначе обстоит дело с облаками плазмы. В них плотность частиц достигает 1—25 $см^{-3}$, энергия — 10 кэВ. При таких концентрациях существует очень сильное электростатическое взаимодействие между протонами и электронами облака плазмы. Это заставляет частицы противоположного заряда двигаться вместе. При движении такого облака в солнечной атмосфере возбуждаются плазменные колебания, наблюдаемые на Земле как радиовсплески типа II. Частота этого излучения уменьшается от 200 до 10 МГц примерно за 10 мин. Скорости облака плазмы находятся в пределах 200—1500 км/с. Эти скорости сравнимы со скоростями плазмы, которая вызывает магнитосферные бури. Поэтому можно предположить, что радиоизлучение типа II свидетельствует об уходе от Солнца плазмы, вызывающей бурю.

Облака плазмы в отличие от высокоэнергичных протонов способны исказить межпланетные магнитные поля. Это повлияет на движение галактических космических лучей. Важно отметить еще раз, что выброс облака плазмы из вспышек сопровождается радиовсплесками типа II. На это также указывает движение вверх области генерации излучения типа IV. Корона вблизи области вспышки становится очень горячей и излучает как мягкое рентгеновское излучение, так и интенсивное ультрафиолетовое и далекое ультрафиолетовое излучение. Рис. 3 позволяет судить об основных процессах, которые происходят во время типичной солнечной бури.

Мы не будем рассматривать солнечные космические лучи и электроны высоких энергий. Они представляют малый интерес для проблемы полярных сияний. Остановимся на процессах выброса и движения к Земле облаков солнечной плазмы, которая вызывает на Земле магнитные бури и полярные сияния, а также другие сопутствующие явления.

Солнечный ветер. Длительное время считалось вполне естественным, что за пределами короны Солнца находится пустое пространство. В таком случае выброс (инжекция) облака солнечной плазмы во время солнечной бури должен происходить в свободное пространство. Однако дальнейшие исследования показали, что из поверхности Солнца непрерывно истекает плазма, названная солнечным ветром.

Изучение этой проблемы связывается прежде всего с именем Паркера. Он предположил, что внезапное увеличение температуры в короне над областью вспышки генерирует взрывную волну, которая распространяется сферически от точечного источника в неподвижном межпланетном газе, плотность которого падает. Структура ударной волны зависит в основном от того, каким образом энергия бури инжектируется в межпланетную плазму. Обычно продолжительность инжекции меньше, чем время, за которое волна доходит до земной орбиты. В некоторых случаях картина развивается более медленно: облако плазмы действует как поршень.

Были сделаны попытки обнаружить движущуюся солнечную плазму за фронтом ударной волны, а также солнечный ветер после прохождения ударной волны. Удалось измерить отношение He^{+++}/H^{+}, которое довольно заметно увеличивается через несколько часов после прохождения

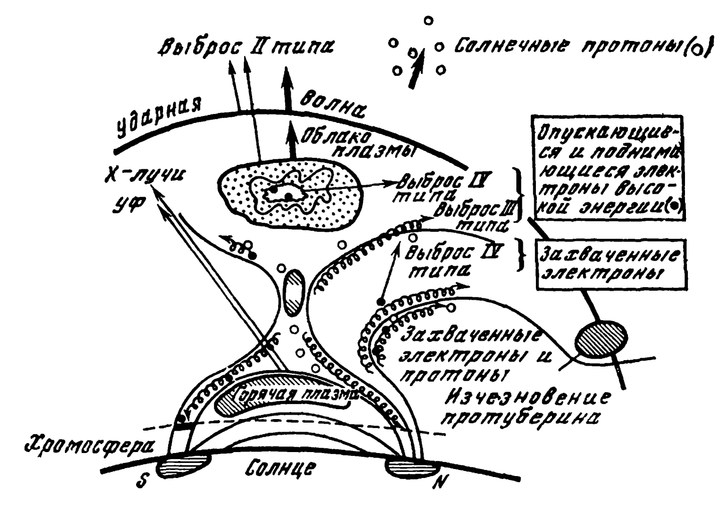


Рис. 3. Схема основных процессов, которые происходят во время типичной солнечной бури

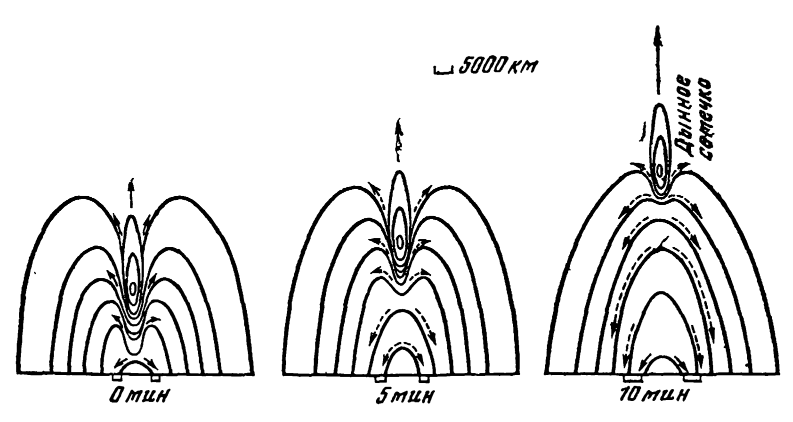


Рис. 4. Схема, иллюстрирующая механизм выталкивания диамагнитной солнечной плазмы из неоднородного магнитного поля

ударной волны. Это соответствует значительному различию в составе солнечной плазмы.

Для проблемы солнечно-земных связей важен вопрос о выбросе солнечной плазмы. Однако рассматривать его подробно мы не можем. Приведем только схематически возможный механизм такого выброса (рис. 4). Как видим, происходит выталкивание диамагнитной солнечной плазмы

из неоднородного магнитного поля. При этом часть выброшенного вещества вызывает уярчение, которое подобно вспышке. В этом механизме до высот 2000—3000 км плазма быстро ускоряется, затем после продолжительного движения с постоянной скоростью она быстро замедляется под действием гравитации.

МЕЖПЛАНЕТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Если бы межпланетное пространство было вакуумом, то единственными магнитными полями в нем могли быть лишь поля Солнца и планет, а также поле галактического происхождения, которое простирается вдоль спиральных ветвей нашей Галактики. При этом поля Солнца и планет в межпланетном пространстве были бы крайне слабы.

На самом деле межпланетное пространство не является вакуумом, а заполнено ионизованным газом, испускаемым Солнцем (солнечным ветром). Концентрация этого газа 1—10 $см^{-3}$, типичные величины скоростей между 300 и 800 км/с, температура близка к 10^5 K (напомним, что температура короны $2 \cdot 10^6$ K).

Поскольку газ солнечного ветра почти полностью ионизованный, то его электропроводность очень велика (10^2 Мо/см). Проводники с высокой проводимостью имеют особенность сопротивляться изменению магнитного поля. Другими словами, проникновение магнитного поля в такой проводник невозможно.

Движущийся солнечный ветер будет уносить солнечное магнитное поле в межпланетное пространство. Так как поток плазмы начинается в короне Солнца (или ниже нее), то в солнечном ветре имеются магнитные поля. Величина магнитных полей на Солнце составляет от 1 до 1000 Гс.

Поток солнечной плазмы «выметает» из внутренней части солнечной системы планетные и галактические магнитные поля. Солнечный ветер будет «гнать» галактическое поле перед собой до тех пор, пока не будет достигнуто динамическое равновесие между давлением солнечного ветра и давлением галактической среды. Это происходит на расстоянии от 10 до 100 астрономических единиц (а. е.). Следовательно, межпланетное пространство ограничено полостью в галактической среде, размеры которой дают верхнюю границу величины солнечно-межпланетного магнитного поля.

Силовые линии магнитного поля солнечного ветра простираются в межпланетное пространство за орбиту Земли, при этом один их конец находится на Солнце. Характеристики солнечного ветра и межпланетных магнитных полей нерегулярны и асимметричны из-за волокнистой структуры короны, нерегулярностей магнитных полей в фотосфере и т. д.

Радиальная компонента межпланетного магнитного поля B_r должна уменьшаться обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца (т. е. как r^{-2}). Она может быть выражена через величину радиальной компоненты поля на поверхности Солнца. Если на Солнце магнитное поле равно $B_{r_0}=0{,}5$ Гс, то на расстоянии 1 а.е. поле $B_r \approx 1\gamma$.

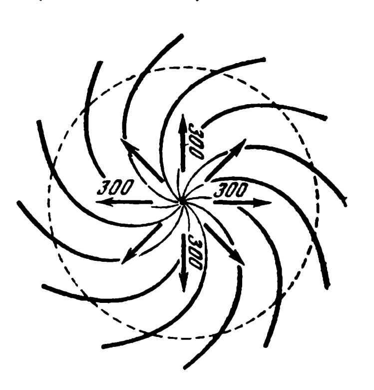


Рис. 5. Спиральное солнечно-межпланетное магнитное поле в плоскости солнечного экватора (или в плоскости эклиптики) для спокойного Солнца

Истечение плазмы из Солнца происходит таким образом, что плазма просто отталкивает силовые линии поля и покидает Солнце в радиальном направлении. Если бы Солнце не вращалось, то такое радиальное истечение плазмы привело бы к тому, что силовые линии магнитного поля были бы также радиальны и параллельны движению частиц. Поскольку Солнце вращается, то магнитное поле приобретает поперечную компоненту (в плоскостях, перпендикулярных оси вращения) и силовые линии магнитного поля становятся спиральными (рис. 5).

Направление спирального поля можно оценить, если предположить, что один конец силовой линии закреплен на Солнце и вращается вместе с ним. Тогда частицы, которые непрерывно испускаются данной областью вращающейся короны, будут двигаться в экваториальной плоскости по спиралям Архимеда. (Это напоминает работу вращающегося поливального устройства). Таким образом, межпланетное магнитное поле приобретает и поперечную компоненту B_φ. Можно оценить, что вблизи орбиты Земли угол спирали с радиусом составляет около 45° и радиальная и поперечная компоненты $B_\varphi = B_r = 1\gamma$.

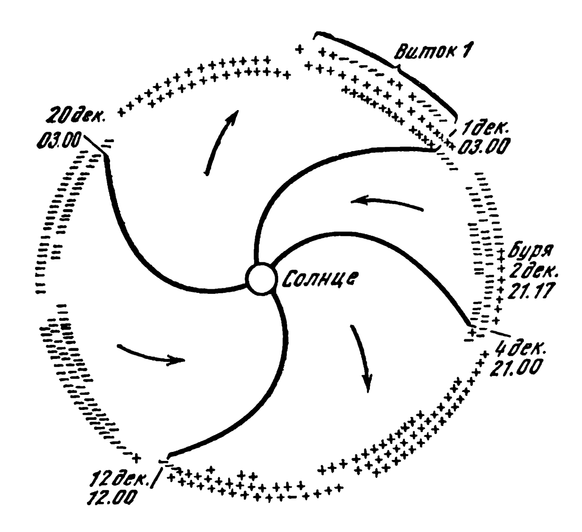


Рис. 6. Секторная структура межпланетного магнитного поля

Стрелками и знаками обозначено направление межпланетного магнитного поля. Спиралями Архимеда отделены воображаемые границы секторов

Первые измерения магнитных полей за пределами магнитосферы Земли были проведены на спутнике «Пионер-1» в октябре 1958 г. Они позволили установить существование и положение области перехода от внешней части геомагнитного поля к межпланетному пространству. Эти результаты были подтверждены измерениями на других ИСЗ. Экспериментально было установлено, что имеются значительные нерегулярности, наложенные на спиральное межпланетное поле.

Спутниковые измерения межпланетного магнитного поля выявили тесную связь между величиной магнитного поля, перпендикулярного оси вращения аппарата (поперечной составляющей $B_\perp$), и значением магнитного индекса K или A.

Перед началом и в период геомагнитных бурь величина $B_\perp$ увеличивается на порядок и приобретает более нерегулярный характер, чем в спокойные периоды.

Это объясняется тем, что плазма из возмущенных областей на Солнце может уносить в межпланетное пространство более интенсивные и более нерегулярные поля. А это приводит к появлению нерегулярностей в спокойном

межпланетном поле, что подтверждают измерения на спутниках.

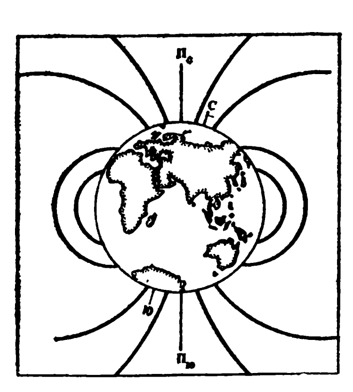
Обнаружена также прямая корреляция между изменениями межпланетного поля по данным спутников и солнечной активностью. По этим данным была оценена средняя скорость распространения возмущения, равная ~1000 км/с.

Вектор межпланетного магнитного поля имеет радиальную составляющую B_r, направленную или от Солнца (знак +), или к Солнцу (знак −). Межпланетное пространство разделено на чередующиеся спиральные секторы, в каждом из которых радиальная компонента направлена либо наружу, либо вовнутрь. На рис. 6 показана межпланетная секторная структура, наблюдаемая на расстоянии с Земли в течение двух с половиной периодов вращения Солнца с 1 декабря 1964 г.

В пределах каждого сектора скорость солнечного ветра и плотность частиц систематически изменяются. Наблюдения с помощью ракет показывают, что оба параметра резко увеличиваются на границе сектора. В конце второго дня после прохождения границы сектора плотность очень быстро, а затем, через два или три дня, медленно начинает расти. Скорость солнечного ветра уменьшается медленно на второй или третий день после достижения пика. Секторная структура и отмеченные вариации скорости и плотности тесно связаны с магнитосферными возмущениями. Секторная структура довольно устойчива, поэтому вся структура потока вращается с Солнцем по крайней мере в течение нескольких солнечных оборотов, проходя над Землей приблизительно через каждые 27 дней.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Английский ученый Уильям Гильберт, придворный врач королевы Елизаветы, в 1600 г. впервые показал, что Земля является магнитом, ось которого не совпадает с осью вращения Земли. Следовательно, вокруг Земли, как и около любого магнита, существует магнитное поле. В 1635 г. Геллибранд обнаружил, что поле земного магнита медленно меняется, а Эдмунд Галлей провел первую в мире магнитную съемку океанов и создал первые мировые магнитные карты (1702 г.). В 1835 г. Гаусс провел сферический гармонический анализ магнитного поля Зем-



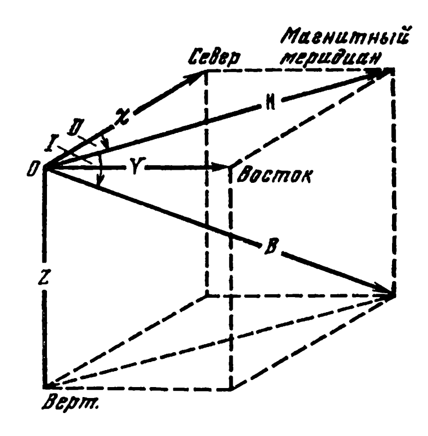


Рис. 7. Силовые линии геомагнитного дипольного поля

Магнитные полюсы наклонения $П_с$ и $П_ю$. Географические полюсы С и Ю. Магнитные меридианы идут от одного полюса к другому

Рис. 8. Напряженность геомагнитного поля $\overline{B}$, ее ортогональные компоненты X, Y и Z и элементы H, D и I

ли. Он создал первую в мире магнитную обсерваторию в Гёттингене.

О распределении силовых линий магнитного дипольного поля и о магнитных полюсах наклонения $П_с$, $П_ю$ можно судить по рис. 7.

Составляющие геомагнитного поля определены следующим образом. В любой точке O вектор напряженности магнитного поля B может быть разложен на составляющие, как это показано на рис. 8. Можно выбрать в качестве составляющих абсолютную величину полного вектора B (модуль) и два угла: D и I. Угол D образован направлением на север и горизонтальной составляющей вектора **B**, т. е. H; I — это угол между **B** и **H**. Угол D считается положительным, если H отклоняется к востоку, а I положительно при отклонении **B** вниз от горизонтальной плоскости. Величина D называется магнитным склонением, а I — наклонением. Вертикальная плоскость, которая проходит через H, именуется местной магнитной меридиональной плоскостью.

Используется также разложение **B** на северную (X) и восточную (Y) составляющие вектора **H**. Третьей служит вертикальная составляющая Z, которая считается по-

ложительной, если **B** направлено вниз. Напряженности B, H, Z, X, Y измеряются в гауссах (Гс) или гаммах (γ). $1\gamma = 10^{-5}$ Гс. Углы D и I измеряются в дуговых градусах и минутах. Все приведенные семь величин B, H, D, I, X, Y, Z называются магнитными элементами. Соотношения между ними ясны из рис. 8:

$$H = B\cos I, \qquad Z = B\sin I = H\,\mathrm{tg}\,I,$$
$$X = H\cos D, \qquad Y = H\sin D,$$
$$X^2 + Y^2 = H^2, \qquad X^2 + Y^2 + Z^2 = H^2 + Z^2 = B^2.$$

Ясно, что для полного описания вектора **B** достаточно иметь три независимых элемента. По ним могут быть рассчитаны все остальные.

Обычная стрелка магнитного компаса уравновешивается, вращаясь горизонтально на вертикальной оси. В северной полусфере Земли почти везде северный полюс магнитной стрелки направлен вниз (т. е. I положительно), а в южном полушарии I отрицательно, поскольку вниз направлен южный полюс стрелки. Линия, которая разделяет области положительного и отрицательного I, называется магнитным экватором или экватором наклонения. Естественно, что на ней $I = 0$, т. е. магнитная стрелка в любой точке на этой кривой располагается горизонтально.

На полюсах магнитного наклонения горизонтальная компонента полного вектора **B** исчезает и магнитная стрелка устанавливается вертикально. Эти точки еще называют полюсами наклонения. Таких точек в принципе может быть несколько. Две основные из них обычно называются магнитными полюсами Земли. Они расположены в Арктике и в Антарктиде. Координаты их 75°,6 с. ш., 101° з. д. и 66°,3 ю. ш., 141° в. д. Местоположение магнитных полюсов не является постоянным. Приведенные выше координаты относятся к эпохе 1965 г.

Чтобы определить азимут вектора **H**, нужно выбрать некоторое нулевое направление, от которого можно отсчитывать магнитное склонение D. За такое направление принято направление на северный географический полюс. Таким образом, D определяется относительно условного направления, поскольку ось вращения Земли не связана непосредственно с конфигурацией геомагнитного поля. То же относится и к элементам X и Y. Поэтому D, X, Y называют относительными магнитными элементами, тогда как H, Z и I именуются собственными магнитными элементами.

Несколько слов о магнитных картах. Обычно через каждые 5 лет распределение магнитного поля на поверхности Земли представляется магнитными картами трех или более магнитных элементов. На каждой из таких карт проводятся изолинии, вдоль которых данный элемент имеет постоянную величину. Линии равного склонения D называются изогонами, наклонения I — изоклинами, величины полной силы B — изодинамическими линиями или изодинами. Изомагнитные линии элементов H, Z, X и Y называются соответственно изолиниями горизонтальной, вертикальной, северной или восточной компонент.

Направление оси магнитного диполя практически не меняется с 1829 г. При этом магнитный момент диполя систематически уменьшался. Его уменьшение может быть аппроксимировано выражением

$$\mu = (15{,}77 - 0{,}003951t)\,10^{25}\ \text{Гс}\cdot\text{см}^3,$$

где t — время в годах, отсчитываемое вперед или назад от 1900 г. н. э. По этой формуле можно рассчитать, что если уменьшение магнитного момента будет продолжаться с такой же скоростью, то к 3991 г. магнитный момент станет равным нулю.

Мы будем постоянно иметь дело с геомагнитными силовыми линиями, а также различного рода координатами.

Геомагнитные дипольные координаты — это дополнение к широте θ' и восточной долготе φ'. Они определяются относительно полярной оси и нулевого меридиана. Если точка P имеет географические координаты θ и φ, то геомагнитные координаты могут быть вычислены по следующим формулам:

$$\cos\theta' = -\cos\theta\cos\theta_0 - \sin\theta\sin\theta_0\cos(\varphi - \varphi_0),$$

$$\sin\varphi' = \sin\theta\cdot\sin(\varphi - \varphi_0)\operatorname{cosec}\theta'.$$

Магнитное склонение дипольного поля Ψ — это угол, образованный магнитным и географическим меридианами в точке P. Он определяется из выражения

$$\sin(-\psi) = \sin\theta_0\,\frac{\sin(\varphi - \varphi_0)}{\sin\theta'}.$$

Существуют таблицы, которые содержат геомагнитные координаты сетки точек, расположенных через ровные угловые интервалы в географических координатах θ и φ. Имеются также сетки географических и геомагнитных координат. По этим сеткам можно легко найти геомагнит-

ные координаты любой точки с известными географическими координатами, и наоборот.

Обратный переход от геомагнитных координат к географическим можно произвести по формулам

$$\cos\theta = \cos\theta' \cdot \cos\theta_0 - \sin\theta' \cdot \sin\theta_0 \cos\varphi',$$
$$\sin(\varphi - \varphi_0) = \sin\theta' \sin\varphi' \operatorname{cosec}\theta.$$

Если рассматривать только дипольную часть геомагнитного поля в любой точке P с геомагнитными координатами θ' и φ', то потенциал V_1, описываемый членами первого порядка, равен $V_1 = -\mu \frac{\cos\theta}{r^2}$ Так как V_1 не зависит от долготы, то восточная компонента дипольного поля **B** равна нулю. Северная H и вертикальная Z составляющие поля получаются равными

$$H = \mu \frac{\sin\theta'}{r^3} = H_0 \left(\frac{a}{r}\right)^3 \sin\theta',$$
$$Z = 2\mu \frac{\cos\theta'}{r^3} = Z_0 \left(\frac{a}{r}\right)^3 \cos\theta'; \qquad Z_0 = 2H_0,$$

где Z_0 и H_0 — максимальные значения Z и H на геоцентрической сфере радиуса a, содержащей точку P. H_0 соответствует полю на геомагнитном экваторе, а Z_0 — на северном полюсе. На южном полюсе $Z=-Z_0$.

Наклонение I и магнитную широту λ' можно определить из следующих уравнений:

$$\operatorname{tg} I = \frac{Z}{H} 2 \operatorname{ctg}\theta', \qquad \operatorname{tg}\lambda' = \frac{1}{2} \operatorname{tg} I.$$

Каждая силовая линия дипольного поля лежит в плоскости геомагнитного меридиана. Ее уравнение

$$r = r_e \cdot \sin^2\theta',$$

где r_e — радиальное расстояние, на котором данная силовая линия пересекает плоскость геомагнитного экватора, с величиной поля равной μ/r_e^3. Величину r_e можно принять за параметр, определяющий силовую линию.

Напряженность поля в точке P можно определить через параметр силовой линии

$$B = \sqrt{H^2 + Z^2} = \frac{\mu c}{r^3} = \frac{\mu}{r_e^3} \cdot \frac{c}{\sin^6\theta'} = \frac{B_e c}{\sin^6\theta'},$$
$$B_e = \frac{\mu}{r_e^3}.$$

Представление геомагнитного поля центральным диполем только лишь первое весьма грубое приближение. Используя более высокие члены разложения по сферическим гармоникам, можно построить геомагнитную систему координат, лучшую, чем дипольная. Так, если использовать наряду с дипольными еще пять старших сферических гармонических членов и рассчитать геометрическое место точек пересечения земной поверхности силовыми линиями, которые располагаются в экваториальной плоскости на расстоянии пяти-шести радиусов Земли, то полученная таким образом линия хорошо совпадает с зоной полярных сияний.

Было также показано, что если проектировать по силовым линиям на поверхность Земли лежащие в плоскости экватора геоцентрические окружности с радиусами $L_c = a \operatorname{cosec}^2 \theta'_c$, то полученные таким путем широты θ'_c упорядочивают явления в полярной шапке лучше, чем дипольные геомагнитные широты.

Часто используют «исправленные» геомагнитные координаты при описании различных авроральных явлений и поглощения космического радиоизлучения в полярной шапке. Они были рассчитаны Хакурой на основе исследований Халтквиста. Дальнейшее усовершенствование этих «исправленных» геомагнитных координат выполнил Густавсон, использовав коэффициенты разложения поля на эпоху 1965 г.

При объяснении некоторых явлений, которые связаны с суточными вариациями полярных сияний, было введено понятие геомагнитных полуночи и полудня. Затем появилось и более общее понятие геомагнитного времени.

Если данная точка определена географическими координатами θ и φ и геомагнитными координатами θ' и φ', то геомагнитное время может быть выражено соотношением $15° t' = \varphi_H' - \varphi'$. Здесь φ'_H — геомагнитная долгота полудня в данный момент времени. Геомагнитное время t' отсчитывается от геомагнитного полудня и относительно истинного положения Солнца H.

Используя схему определения «геомагнитного времени» в системе геомагнитных координат (рис. 9), приведем пример его расчета. Если в Гринвиче истинное время t_G, в точке P местное истинное время составит $t_G + \varphi/15°$, то географическая долгота истинного положения Солнца будет $180° - 15°\ t_G$. Отсюда, учитывая также полярный угол этого

положения (который определяется как 90°—δ, где δ обозначает склонение Солнца), геомагнитную долготу φ_H' можно рассчитать по приведенным выше формулам. Гринвичское среднее время в этот момент будет $t_c - e$, где e обозначает «уравнение времени».

Вернемся к рис. 9. Там показан круг с угловым радиусом 90°—δ, который описывает положение Солнца на земной поверхности. Дуга большого круга, проведенная через точку P и геомагнитный полюс B, пересекает этот круг в точках H_n' и H_m', которые указывают положение Солнца соответственно в моменты геомагнитного полудня и геомагнитной полуночи точки P. Эти моменты зависят от широты точки P. Положения Солнца в местные истинные полдень и полночь указаны точками H_n и H_m соответственно. Когда δ положительно (лето в северном полушарии), то утренняя половина геомагнитных суток не равна вечерней. В высоких широтах геомагнитное время может очень сильно отличаться от истинного или среднего времени в течение большей части суток.

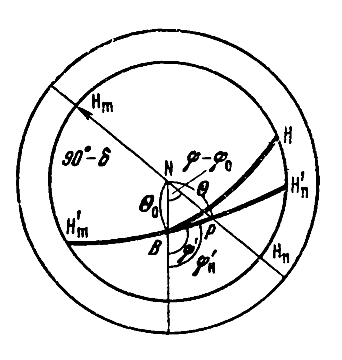


Рис. 9. Схема определения «геомагнитного времени» в системе геомагнитных координат

Говоря о времени и системах координат, скажем еще об учете эксцентричности магнитного диполя. Эксцентричный диполь медленно дрейфует наружу (к северу и к западу) с 1836 г. Экваториальную плоскость он пересек примерно в 1862 г. Его траектория по радиальной проекции расположена в районе о-ва Гилберта в Тихом океане.

Ось эксцентрического диполя, проведенная через точку O' параллельно AB, пересекает поверхность Земли в точках B' и A', которые расположены соответственно вблизи B и A. В этих точках наклонение поля эксцентрического диполя не равно нулю. Полоса наклонения поля эксцентрического диполя (точки B и A) находится в меридиональной плоскости $BO'A$ несколько дальше от точек B и A. Западная долгота этой плоскости в геомагнитной системе координат возросла с 110° в 1836 г. до 143° в 1965 г. Углы BOB' и AOA' за этот же промежуток вре-

мени увеличились с 2,4° до 40°. Углы BOB'' и AOA'', как правило, не равны друг другу: в 1836 г. они составляли 7,2° и 5,5°, а в 1965 г.– 11,8° и 13,2°

Геомагнитные индексы. Геомагнитная активность описывается различными геомагнитными индексами, используемыми в геомагнетизме, физике ионосферы, солнечной физике, физике полярных сияний. Магнитные обсерватории всего мира посылают свои индексы в Международный центр Де Бильт (Нидерланды), который связан с Постоянной Службой геомагнитных индексов в Гёттингене (ФРГ). Эти локальные индексы — основа планетарных индексов. Остановимся на них подробнее.

Индексы C и C_i. Магнитограмма на каждой обсерватории за каждые сутки (начало суток отсчитывается от 00 ч гринвичского времени) оценивается по степени возмущенности магнитного поля баллами 0, 1 или 2. Баллы выбираются простым просмотром магнитограмм. Это и есть индекс C для данных суток данной обсерватории. Затем индексы C поступают в единый центр и там усредняются с точностью до 0,1 для каждых суток. Так определяется значение международного ежедневного индекса C_i. Индексы C_i имеют градации через 0,1, в результате чего получается 21-балльная классификация гринвичских суток (от 0,0 для спокойных дней до 2,0 для возмущенных).

Чаще всего в анализах используются индексы k и k_p. Эти индексы определяются для 3-часовых интервалов, т. е. имеется восемь значений индексов для каждых гринвичских суток. При определении k-индексов берутся три компоненты магнитного поля: H, D и Z. Для каждой компоненты оценивается амплитуда r в течение 3-часового интервала. Наибольшая из трех амплитуд в каждом временном интервале употребляется для вывода k-индекса. Составлены таблицы, дающие пределы r, определяемые полулогарифмической шкалой, для каждой обсерватории и для каждой из 10 величин k (0, 1, ..., 9). Эта связь между r и k выбирается такой, чтобы весь диапазон изменения геомагнитной активности, от самых спокойных условий до самой мощной бури, можно было выразить в шкале, состоящей из одной цифры. Нижний предел r для $k=9$ в зависимости от общего уровня геомагнитной активности является бо́льшим или меньшим. В зоне полярных сияний этот предел равен 2500 γ, тогда как для обсерваторий низких широт 300 γ. Так определяется местный (локальный) индекс k.

Планетарный индекс k или k_p — индекс Бартельса служат для выражения характеристики планетарной геомагнитной активности. Исправленные и стандартизованные значения k подготавливаются Постоянной службой в Гёттингене для каждой из 12 выбранных обсерваторий, расположенных в северном и южном полушариях. Среднее значение k-величин этих 12 обсерваторий и дает величину k_p-индекса. Он называется планетарным трехчасовым индексом и выражается в шкале с точностью до $^1/_3$:

$$0_0, 0_+, 1_-, 1_0, 1_+, 2_-, 2_0, 2_+, 3_-, 3_0, 3_+ \ldots 9_-, 9_0, 9_+.$$

Всего получится 28 баллов.

Ежедневный индекс Σk_p получается суммированием величин за 8 3-х часовых интервалов суток.

k_p-индекс обладает полулогарифмической связью с амплитудой r. Если перевести k_p в линейную шкалу, то получится a_p-индекс. Имеется таблица для пересчета индексов k_p в индексы a_p. Сумма восьми величин a_p для каждого дня дает ежедневный A_p-индекс.

На основании индексов A_p можно рассчитать индексы C_p, которые имеют величины от 0,0 до 2,0 через 0,1 (всего 21 величины). Имеется таблица пересчета A_p в C_p.

На основании индекса C_p рассчитывается индекс C_9 (всего 10 величин: 0, 1, ... 9). Значения C_p разбиты на диапазоны, каждый из которых соответствует определенной величине C_9 (0,0—0,1; 0,2—0,3; 0,4—0,5; 0,6—0,7; 0,8—0,9; 1,0—1,1; 1,2—1,4; 1,5—1,8; 1,9; 2,0—2,5).

Описанные индексы геомагнитного поля либо не учитывают, либо недостаточно учитывают структуру составляющих магнитного поля и его частей. Поэтому они обычно не используются для детальных количественных исследований. Существуют и другие, более детальные индексы.

D_{st}-индекс дает среднее по долготе уменьшение горизонтальной составляющей поля на низких широтах в единицах γ, которое пропорционально полной кинетической энергии инжектированных частиц, захваченных в радиационном поясе. D_{st}-индекс выражает амплитуду первого коэффициента гармонического ряда, который получается при Фурье-разложении поля главной фазы магнитной бури как функции геомагнитной долготы.

Индексы AE, AL и AU разработаны для получения интенсивности авроральной электроструи в γ. Они позволяют контролировать интенсивность полярной электроструи по вариациям горизонтальной компоненты магнит-

ного поля на обсерваториях зоны полярных сияний и равномерно расположенных по долготе. AE-индекс получается суперпозицией этих записей. Когда произведена суперпозиция записей магнитного поля, то расстояние между верхней и нижней кривыми и есть AE-индекс. Верхняя огибающая дает AU-индекс, а нижняя огибающая — AL-индекс. Эти индексы можно получить в неограниченном разрешении во времени. Но обычно достаточно иметь их значение через 2,5 мин.

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ, МАГНИТНОМ И ДРУГИХ СИЛОВЫХ ПОЛЯХ

Если заряженная частица помещена в электрическое поле, она под действием этого поля начнет двигаться. Направление движения будет определяться направлением электрического поля и знаком электрического заряда. При этом протоны и электроны двигаются в противоположных направлениях. Возникает электрический ток, направление которого чисто условно принято считать обратным направлению движения электронов (т. е. совпадающим с направлением движения протонов). Для того чтобы рассчитать величину этого электрического тока, надо величину электрического поля умножить на проводимость среды, в которой ток течет. Как известно, проводимость твердых или жидких веществ отличается от проводимости газов. Нас интересуют газы, а точнее, частично ионизованная плазма, в которой только часть атомов и молекул ионизована.

Такая относительно простая картина имеет место в случае плазмы, помещенной в электрическое поле. Ситуация сильно усложняется, если на эту плазму с электрическим полем «наложить» еще и магнитное поле.

Так, если без магнитного поля электроны и протоны двигались в противоположных направлениях и создавали электрический ток, то в присутствии магнитного поля при действии того же электрического поля электроны и протоны начнут перемещаться в одном и том же направлении. При равенстве их концентраций это движение не будет представлять собой электрического тока, поскольку суммарный перемещающийся электрический заряд равен нулю. Кроме того, в присутствии магнитного поля заря-

женные частицы перемещаются не вдоль (или против) направления электрического поля, а поперек этих полей, но в случае, если оба эти поля перпендикулярны друг другу.

В отсутствии магнитного поля мы говорили просто о проводимости плазмы (ионизованного газа). В присутствии же магнитного — мы должны говорить о нескольких типах проводимости: вдоль магнитного поля, поперек него и т. п. Электрически заряженным частицам отнюдь не одинаково легко двигаться в этих направлениях. Другими словами, среда, которая до наложения магнитного поля была изотропной, т. е. ее свойства не зависели от направления, после наложения становится анизотропной.

Вся проблема солнечно-земной физики связана с частично или полностью ионизованной плазмой, помещенной в магнитное поле (магнитное поле солнечных пятен, межпланетное магнитное поле, магнитное поле Земли). Причем на эту плазму действуют различные силы (силовые поля): электрическое поле, силы притяжения и силы, связанные с градиентами давления, градиентами и конфигурацией магнитного поля и т. п. Поэтому необходимо проанализировать, как же движутся заряженные частицы в таких ситуациях.

Рассмотрим возможные варианты.

1. Электрически заряженная частица движется вдоль магнитного поля. Легко показать, что в этом случае она не чувствует его наличие и движется так же, как и в его отсутствии. Это благоприятные условия для движения заряженных частиц. Поскольку силовые линии магнитного поля Земли почти вертикальны в высоких широтах в обоих полушариях, то это и создает благоприятные условия для осаждения (соскальзывания) заряженных частиц в атмосферу этих широт. В низких широтах и на экваторе частицам пришлось бы прорываться поперек силовых линий магнитного поля Земли, а это для частиц с энергиями, при которых они вызывают полярные сияния, непреодолимо трудно.

2. Заряженные частицы движутся поперек магнитного поля. В этом случае на частицу начинает действовать сила (рис. 10), которая норовит закрутить ее вокруг силовой линии магнитного поля (сила Лоренца). Как только траектория частицы закручивается, начинает действовать центробежная (направленная от центра кривизны) сила, прямо пропорциональная массе и квадрату скорости частиц

(их произведению) и обратно пропорциональная радиусу кривизны траектории частицы. Движение будет установившимся, если эти силы уравновесятся. Из их равенства получим, что радиус окружности, по которой будет вращаться частица (так называемый радиус Лармора) равен

$$\rho = \frac{mV_n}{eB},$$

а угловая скорость ω и период вращения T при этом равны

$$\omega = \frac{eB}{m}, \qquad T = \frac{2\pi m}{eB},$$

где e — величина электрического заряда частицы, m — масса частицы, V_n — скорость частицы поперек магнитного поля, B — величина магнитного поля.

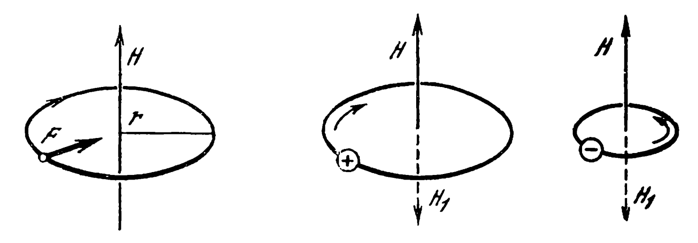


Рис. 10 Направление силы Лоренца при движении частицы перпендикулярно магнитному полю

Рис. 11. Направление вращения положительно и отрицательно заряженных частиц вокруг силовой линии магнитного поля H

H_1 — магнитное поле, создаваемое движущимся электрическим зарядом

Отсюда следует, что заряженные частицы, которые не движутся строго вдоль силовых линий магнитного поля Земли, будут вращаться вокруг силовых линий (рис. 11). В одном и том же магнитном поле одной и той же скорости движения радиус протонов почти в 2000 раз больше радиуса электронов, т. е. ровно во столько раз, во сколько раз отличаются их массы (1840 раз). Это весьма существенно для физики околоземного пространства. Круговая частота вращения для электронов и протонов также зависит от их массы, только уже не прямо, а обратно пропорционально. Частота вращения протонов (гирочастота) в 1840 раз меньше гирочастоты электронов. Гирочастоты входят в выражения для

проводимостей, значит, и в условия распространения радиоволн. Очень важно для продвижения частицы, сумеет ли она большую часть времени вращаться вокруг силовой линии (тогда она оказывается как бы привязанной к данной силовой линии), или будет часто выталкиваться при соударениях с другими частицами от одной силовой линии к другой, не успев совершить даже одного полного оборота вокруг магнитной силовой линии. Другими словами, важно соотношение частоты вращения и частоты столкновений данной частицы с другими частицами. Если частота вращения (гирочастота) много больше частоты столкновений, то частицы плазмы «вморожены» в магнитное поле.

3. Заряженная частица движется под определенным углом к направлению магнитного поля. Этот угол называется питч-углом. Это движение всегда можно разложить на две составляющие — поперек магнитного поля и одновременно вдоль магнитного поля. Оба эти случая мы выше рассмотрели. Применив описанные выше результаты к этому более общему случаю, получим, что частица, которая имеет составляющие скорости движения и вдоль и поперек магнитного поля одновременно, движется по спирали, накручиваясь на магнитную силовую линию (рис. 12). Шаг спирали будет зависеть от величины продольной скорости, а величина радиуса — от величины поперечной энергии частицы, которая при заданной массе определяется поперечной к магнитному полю скоростью частицы.

4. Заряженная частица движется в магнитном поле и на нее одновременно действует также электрическое поле. В этом случае электрическое поле добавляет частице скорость поперек магнитного поля и одновременно поперек электрического (рис. 13). Величина этой скорости зависит прямо пропорционально от величины последнего и обратно пропорционально от величины первого. Направление дрейфового движения не зависит от знака электрического заряда. Картина движения в этом случае выглядит так: электроны и протоны вращаются по спиралям вокруг магнитных силовых линий в обратных направлениях с разными радиусами и угловыми частотами. Одновременно и те и другие (под действием электрического поля) дрейфуют в одном и том же направлении с одной и той же дрейфовой скоростью (которая не зависит ни от заряда, ни от массы и скорости частицы) поперек как магнитного, так и электрического поля, которые, в свою очередь, перпендикулярны друг другу. Такую картину мы наблюдаем

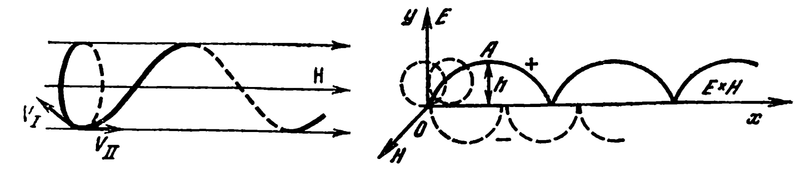


Рис. 12. Движение заряженной частицы по спирали вокруг силовых линий магнитного поля

Рис. 13. Движение заряженных частиц в скрещенных полях по циклоидам

Электрическое поле направлено снизу вверх

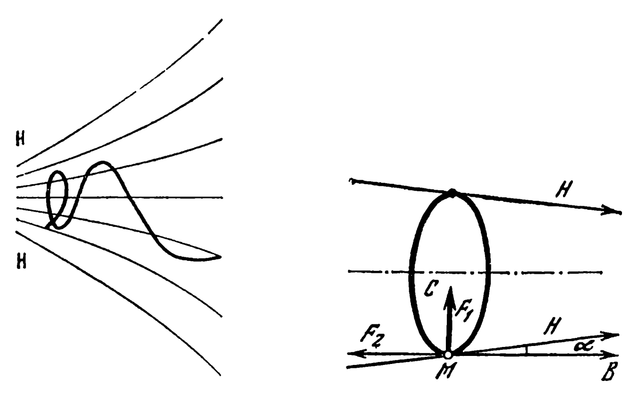


Рис. 14. Траектория заряженной частицы, двигающейся в сторону возрастающего магнитного поля *H*

Рис. 15. Силы, действующие на частицу в магнитном поле со сходящимися силовыми линиями:

F_1 — поддерживает ларморовское вращение; F_2 — выталкивает частицу в сторону ослабевающего поля

в хвосте магнитосферы, где на магнитное поле Земли наложено крупномасштабное электрическое поле, направленное с утренней стороны на вечернюю.

5. Заряженная частица движется в неоднородном магнитном поле. Другими словами, магнитное поле имеет градиент, т. е. изменяется от одной точки пространства к другой.

Если частица движется по спирали вокруг силовой линии магнитного поля, которое по мере продвижения частицы увеличивается (т. е. силовые линии сходятся), то по

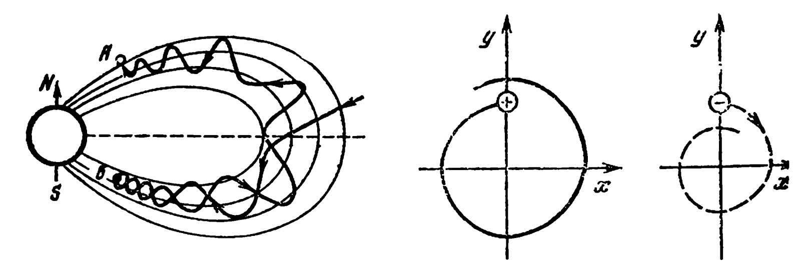


Рис. 16. Движение заряженной частицы в магнитном поле Земли (в меридиональной плоскости)

А и *Б* — точки отражения или зеркальные точки

Рис. 17. Дрейф заряженных частиц, двигающихся в неоднородном магнитном поле в плоскости, перпендикулярной к *H*

мере увеличения магнитного поля она замедляет свое поступательное движение вдоль силовой линии (рис. 14) и при определенном поле отразится и будет продолжать двигаться в обратном направлении, т. е. в сторону уменьшения магнитного поля (рис. 15). В магнитосфере силовые линии магнитного поля сходятся по мере их приближения к поверхности Земли в высоких широтах. Поэтому электроны и протоны, вращаясь вокруг таких силовых линий по спиралям и подходя к местам сгущения силовых линий, отражаются и направляются в другое полушарие (рис. 16). Там они так же отражаются и движутся обратно в прежнее полушарие. Так происходит до тех пор, пока по какой-либо причине они не попадут в область плотной атмосферы, где в соударениях с нейтральными частицами потеряют свою энергию. Такая критическая ситуация может создаться во время геомагнитной бури, когда нарушается структура силовых линий.

Кроме описанного явления, в неоднородном магнитном поле заряженная частица приобретает дрейфовую скорость, перпендикулярную магнитной силовой линии и одновременно направлению наибольшего изменения магнитного поля, т. е. градиента поля (рис. 17). В случае магнитного поля Земли электроны начнут дрейфовать на восток, а протоны — на запад, поскольку градиент магнитного поля направлен по радиусу. В отличие от дрейфа за счет действия электрического поля, когда электроны и протоны дрейфуют вместе, т. е. в одном направлении и с одинаковой по величине скоростью, дрейф электронов и протонов

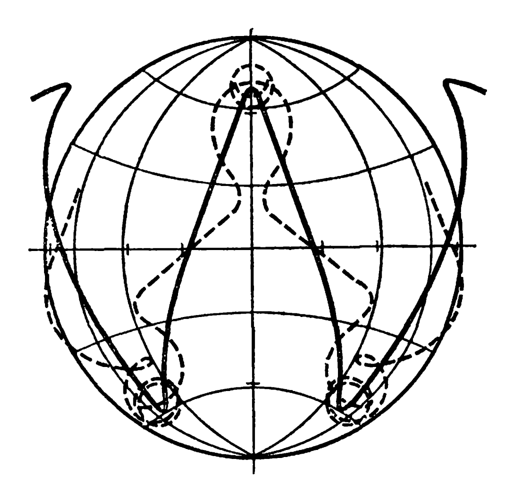


Рис. 18. Схематическое изображение траектории заряженной частицы в магнитном поле Земли

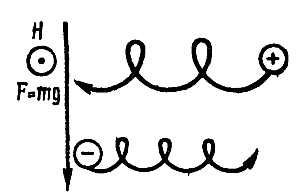


Рис. 19. Дрейф частиц в поле тяжести, перпендикулярном к магнитному полю H

за счет градиента геомагнитного поля создает электрический ток; направление их дрейфа противоположно. Именно этому дрейфу обязан своим происхождением кольцевой ток, текущий в магнитосфере вокруг Земли и изменяющий свою интенсивность в зависимости от поступления заряженных частиц.

Магнитное поле Земли неоднородно не только в радиальном направлении, его силовые линии изогнуты — они выходят из южного полушария и входят в северное, удаляясь на самое большое расстояние от Земли в экваториальной плоскости. Этот факт также отразится на движении заряженных частиц. В результате электроны и протоны будут дрейфовать в противоположных направлениях (восток—запад). Это движение также приводит к образованию электрического тока (рис. 18).

Полученные выше результаты можно приложить к любой действующей на частоту силе. В частности, такой может быть сила земного притяжения, под действием которой заряженные частицы дополнительно приобретают скорость дрейфа, направленную поперек этой силы и одновременно поперек силовым линиям магнитного поля (рис. 19). Это движение также порождает электрический ток, поскольку электроны и протоны (положительные ионы) дрейфуют в противоположных направлениях.

Подведем итог возможных ситуаций в околоземном космическом пространстве. Заряженные частицы вращают-

ся вдоль магнитных силовых линий и одновременно смещаются вдоль силовой линии, т. е. движутся по спиралям. Попадая в области более интенсивного магнитного поля, они отражаются и, продолжая двигаться по спирали, дрейфуют в противоположное полушарие. Затем, отразившись и там, снова возвращаются и т. д. За счет неоднородности геомагнитного поля одновременно с описанным движением, частицы постепенно дрейфуют от одной силовой линии к другой в направлении восток—запад. Этот азимутальный дрейф создает электрический ток, окружающий Землю.

Законы движения заряженных частиц в геомагнитном поле состоят в сохранении трех физических величин: магнитного момента частицы, интеграла действия вдоль силовой линии и магнитного потока через оболочку. Движение заряженных частиц по окружности (вокруг силовой линии магнитного поля) эквивалентно круговому току. Магнитное поле этого кругового тока может быть представлено как поле точечного диполя с магнитным моментом μ:

$$\mu = \frac{\frac{mV_n^2}{2}}{B}.$$

Магнитный момент определяется отношением «поперечной» кинетической энергии частицы к величине магнитного поля. Можно показать, что величина магнитного момента при движении заряженной частицы в магнитном поле остается постоянной. Другими словами, магнитный момент является адиабатическим инвариантом.

Второй, продольный инвариант I равен интегралу (сумме) действия (т. е. mV_s) вдоль силовой линии между точками отражения.

Сохранение μ и I позволяет объяснить образование пояса захваченных вокруг Земли заряженных частиц. Положим, что нам известна величина магнитного поля в данной точке на экваторе, равная B_0, угол между направлением движения частицы и этим полем в данной точке (питч-угол) α_0 и значение I для данной частицы. Рассмотрим, где может оказаться эта частица при последующем движении.

Первый инвариант дает нам, что частица всегда будет отражаться на поверхности $B=B_m$, которая определяется из условия $(\sin^2\alpha)/B=1/B_m$. Однако это еще не означает, что частица всегда будет оставаться на силовой линии, для

которой значение поля на экваторе равно B_0. Первый инвариант не накладывает в этом отношении никаких ограничений, и в частности не препятствует тому, чтобы частица вследствие дрейфа изменила долготу и отразилась на экваторе, т. е. при $B_m=B_0$.

Второй инвариант полагает дополнительное требование на движение частицы. Она не только должна иметь точки отражения на поверхности $B=B_m$, но и интеграл вдоль силовой линии должен оставаться величиной постоянной. На заданной долготе это условие определяет одну единственную силовую линию, вдоль которой частица должна совершать колебания по широте. Закон сохранения второго адиабатического инварианта позволяет установить, вокруг какой силовой линии будет происходить движение частицы при ее азимутальном дрейфе.

Третьим инвариантом движения частицы является инвариант потока. Он связан с долготным азимутальным дрейфом и наиболее легко нарушается. Этот инвариант равен полному потоку вектора магнитного поля **B** через поверхность, ограниченную поверхностью дрейфа частицы по долготе, т. е. поверхностью одинаковых величин второго инварианта.

Все описанные инварианты в общем случае позволяют предсказать движение частицы.

СПОКОЙНАЯ МАГНИТОСФЕРА

До прямых исследований магнитного поля Земли с помощью ИСЗ было принято считать, что оно представляет собой поле диполя. Первые же измерения показали: магнитное поле Земли несимметрично в экваториальной плоскости в направлении день—ночь. С дневной стороны магнитосфера Земли ограничена расстояниями около $10R_з$ (в спокойных условиях). С ночной стороны остатки магнитосферы были зарегистрированы спутниками на удалениях в сотни радиусов Земли. Как видим, магнитосфера не является сферой. Это скорее «груша», повернутая своим хвостиком в антисолнечном направлении.

Решающую роль в образовании реальной магнитосферы Земли играет взаимодействие магнитного поля Земли с потоками солнечной плазмы — солнечным ветром. С дневной стороны (т. е. со стороны Солнца) граница магнитосферы, т. е. магнитопауза, образуется на расстоянии, где давление

солнечного ветра равно давлению магнитного поля Земли. Поэтому во время солнечных бурь, когда давление солнечного ветра существенно увеличивается, магнитопауза на дневной стороне приближается по направлению к Земле. Магнитосфера с дневной стороны поджимается солнечным ветром. При очень интенсивных бурях удаление магнитопаузы может сократиться от десяти до трех радиусов Земли.

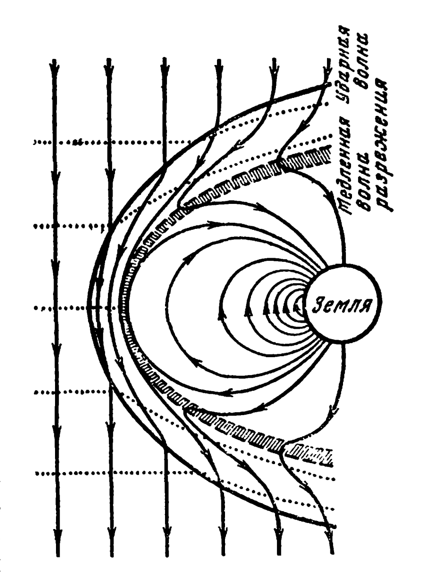


Рис. 20. Структура переходного слоя в присутствии направленного к югу межпланетного магнитного поля

Взаимодействие межпланетного магнитного поля и солнечного ветра с магнитным полем Земли достаточно сложное. Понадобились многочисленные спутниковые эксперименты, прежде чем удалось нарисовать картину такого взаимодействия. В результате этого взаимодействия между областями, занятыми межпланетным магнитным полем и магнитным полем Земли, имеется переходной слой. Этот слой образуется ударной волной набегающего потока солнечной плазмы (рис. 20).

Пересоединение силовых линий магнитных полей позволяет заряженным частицам солнечной плазмы, движение которых определяется магнитными силовыми линиями, проникать из солнечного ветра вовнутрь магнитосферы. На рис. 20 видно, что прямой доступ этих частиц имеется в полярных широтах. Отсюда можно сделать вывод, что самые благоприятные условия проникновения частиц солнечной плазмы имеются непосредственно на геомагнитных полюсах. На самом деле, если рассматривать всю магнитосферу, а не только ее переднюю, лобовую часть, то ситуация несколько изменяется.

На рис. 21 приведен разрез магнитосферы в меридиональной плоскости в направлении Солнце—Земля. Как видим, силовые линии геомагнитного поля, связанные с по-

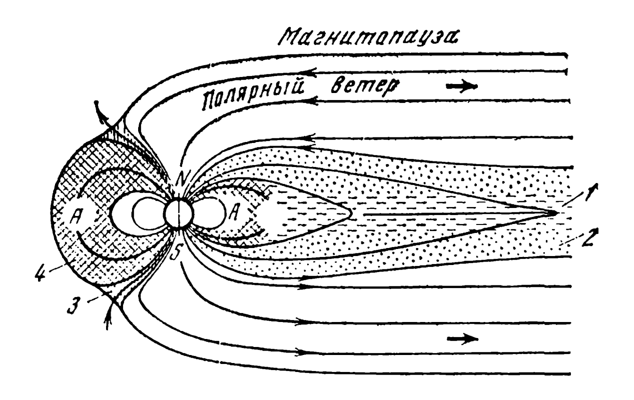


Рис. 21. Структура переходного слоя в плоскости полуденного меридиана и распределение плазмы в магнитосфере

1 — плазменный слой (вблизи Земли); 2 — плазменный слой (далекий); 3 — полярный касп; 4 — кольцевой ток

люсами, не смыкаются с межпланетным магнитным полем, а уходят в хвост магнитосферы (на рисунке переходной слой и межпланетное магнитное поле не показаны). Такая вытянутая в антисолнечном направлении форма магнитосферы обусловлена увлечением магнитного поля Земли потоком солнечного ветра. Силу этого увлечения можно рассчитать, если задаться величиной электрического поля в хвосте магнитосферы (или разностью потенциалов поперек полярной шапки), и размером полярной шапки. Расчет основан на том, что электрическое поле в хвосте магнитосферы, направленное с утренней стороны на вечернюю и проектирующееся в полярные шапки вдоль геомагнитных силовых линий, вызовет конвективное движение плазмы. При разности потенциалов в 1 кВ поперек полярной шапки скорость конвективного движения плазмы вместе с «основаниями» силовых линий составляет около 10^3 см/с. Если считать, что в спокойных условиях диаметр полярной шапки равен $2 \cdot 10^8$ см, то можно определить время ее пересечения — порядка $2 \cdot 10^5$ с. Длина хвоста магнитосферы определяется произведением скорости солнечного ветра и времени, необходимого силовым линиям для пересечения полярной шапки. При этих условиях длина хвоста равна 10^4 км, а сила увлечения магнитного поля потоком солнечной плазмы составит $5 \cdot 10^{11}$ дин ($5 \cdot 10^6$ Н). Ей противодействует сила Лоренца, связанная с возникающей в хвосте магнитосферы системой электрических токов.

Пересоединение силовых линий межпланетного магнитного поля и геомагнитного поля позволяет заряженным частицам из солнечного ветра проникнуть в магнитосферу Земли и далее вдоль силовых линий — в верхнюю атмосферу. Одно из самых убедительных доказательств справедливости этого заключения: солнечные протоны и электроны регистрируются в овальной форме вокруг геомагнитного полюса без существенного временного запаздывания по отношению к потокам частиц, которые обнаруживаются в межпланетном пространстве. Более того, электроны рассматриваются как идеальные «следы» силовых линий.

На рис. 21 показана не только конфигурация магнитного поля Земли, но и области магнитосферы, занятые плазмой, а именно: плазменный слой (далекий), плазменный слой (вблизи Земли), кольцевой ток и полярный касп. Жирной линией в хвосте магнитосферы показан нейтральный слой. Полярные каспы (мешки или воронки) на дневной стороне магнитосферы, обнаруженные с помощью ИСЗ, представляют собой области, в которые вторжение солнечной плазмы наиболее благоприятно. На ночной стороне плазма может проникать в область магнитосферы независимо от того, есть пересоединение силовых линий или его нет.

Как же ведут себя частицы в магнитосфере?

На дневной стороне овала полярных сияний были обнаружены интенсивные потоки частиц плазмы ($\sim 10^9$ см$^{-2}$с$^{-1}$) примерно с такими же характеристиками, как и плазма в переходном слое между магнитопаузой и солнечным ветром. Это свидетельствует о том, что плазма из переходного слоя проникает через магнитопаузу в магнитосферу.

Часть этой плазмы поступает в верхнюю атмосферу высоких широт вдоль овальной полосы. Она вызывает невидимое излучение на длине волны 6300 Å. Эта полоса совпадает с дневной полосой овала полярных сияний. Таким образом, силовые линии, выходящие с дневной стороны овала полярных сияний, связаны с силовыми линиями межпланетного поля, которые лежат в переходной области и за ней.

При рассмотрении движения заряженных частиц в дипольном магнитном поле Земли мы установили, что там должны образовываться области стабильного захвата заряженных частиц. Для этого необходимо, чтобы сохранялись все три инварианта движения частиц. Эти условия

выполняются в статическом дипольном поле. При этом заряженные частицы остаются долго (практически неограниченно) во внутренней области захвата. Такие частицы принято называть стабильно захваченными. Уход энергичной частицы из области захвата несовместим с сохранением инвариантов. Именно поэтому нарушение инвариантов чрезвычайно важно для понимания временных вариаций потоков частиц в радиационном поясе.

Распределение энергичных протонов с энергией больше 50 мэВ показано на рис. 22. Эти протоны образуются следующим образом. Космические лучи, которые вторгаются в атмосферу и сталкиваются с ядрами атомов кислорода и азота, порождают нейтроны двумя путями. Во-первых, это расщепление ядра, в результате чего возникают выбитые нейтроны с энергией порядка 1 МэВ — 1 ГэВ. Во-вторых, это возбуждение ядер, при этом нейтроны «испаряются» по мере перехода ядра к нормальному состоянию (энергия нейтрона более 8 МэВ). Эти нейтроны могут покинуть атмосферу: их движение не ограничено магнитным полем Земли. Те нейтроны, которые возникли в результате «испарения», имеют тенденцию диффундировать через атмосферу, часть из них может свободно пройти через атмосферные слои. Но нейтроны живут около 1000 с. Затем они распадаются на протон и электрон. Таким путем возникают протоны во внутреннем радиационном поясе. Непрерывный поток космических лучей способствует постоянному образованию частиц в радиационных поясах, появившихся за счет распада нейтронов.

Распределение энергичных электронов (больше 5 МэВ) во внутреннем радиационном поясе показано на рис. 23. Эти электроны создаются в процессах распада нейтронов. Имеется определенная часть электронов, рожденных в результате высотных ядерных взрывов. Электроны с энергией меньше 40 кэВ занимают всю область захвата. Они ускоряются во время магнитосферных суббурь, в течение которых большее число таких электронов инжектируется в область захвата и геомагнитный хвост.

Существует еще одна область магнитосферы в виде двух воронок, простирающихся от Земли, каждая из которых опирается на полярную шапку. Концы этих воронок в дневной части магнитосферы совпадают с нейтральной линией (обозначенной на рис. линией *Bb*) на поверхности магнитопаузы. Основные свойства плазмы в этих воронках и в переходном слое между магнитосферой и

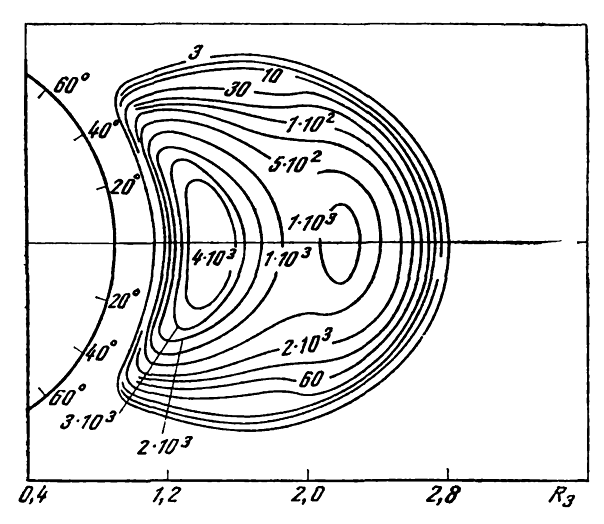
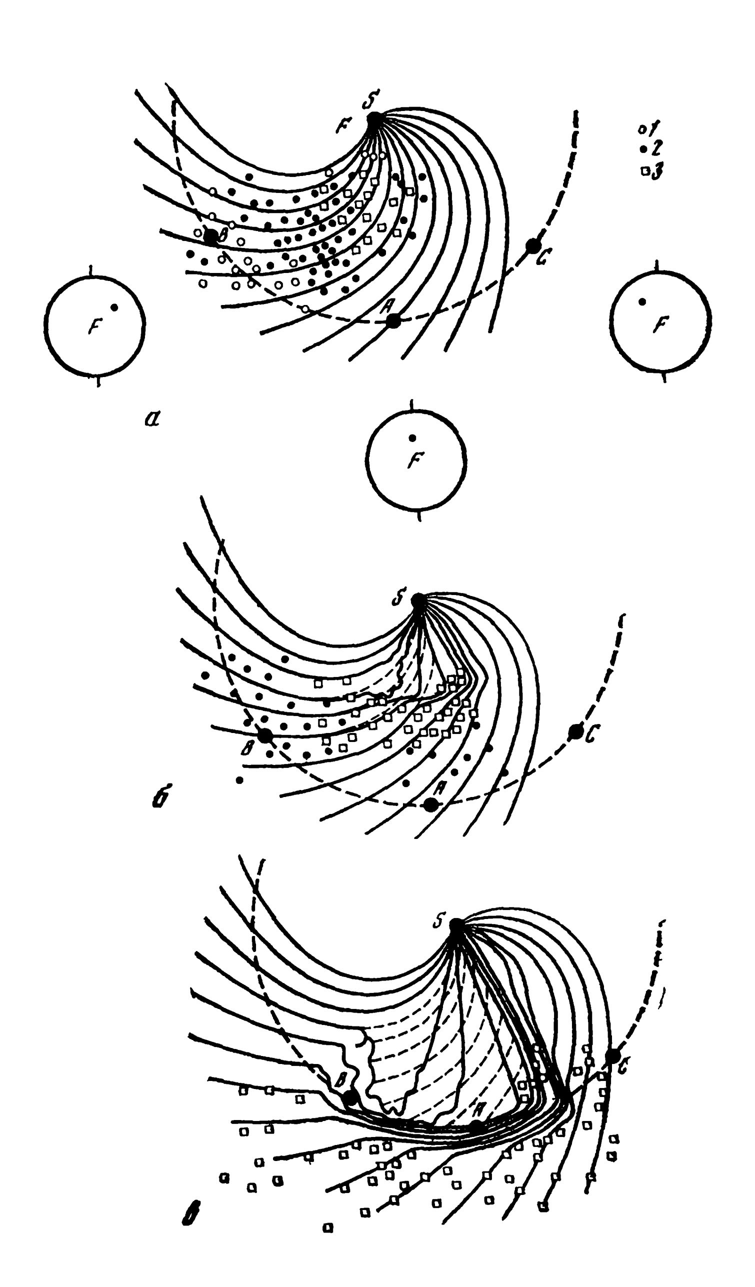


Рис. 22. Распределение потоков протонов ($см^{-2}с^{-1}$) с энергией, большей 50 мэВ

Рис. 23. Распределение электронов с энергией, большей 5 мэВ, наблюдавшееся 10 ноября 1962 г.


S
F
1
2
3
B
A
C
F
F
F
а
S
B
A
C
б
S
B
A
C
в

солнечным ветром чрезвычайно схожи. Поэтому считают, что частицы солнечного ветра имеют свободный доступ в эти области и, проникнув через воронки, высыпаются вдоль дневной стороны овала полярных сияний. На ночной стороне плазма воронок сливается с плазменным слоем.

МАГНИТОСФЕРНАЯ БУРЯ

Проследим далее движение облака солнечной плазмы по направлению к Земле. Рассмотрим три момента в этом движении: через 10—30 мин, 12 ч и 40—50 ч после солнечной вспышки. Ситуация схематически изображена на рис. 24.

Положение солнечной вспышки, как ее видит наблюдатель с Земли, зависит от угла между солнечным радиусом, который проходит через место вспышки и линией Солнце—Земля. Если вспышка видна на центральном меридиане, то Земля расположена в точке A. Если же вспышка видна на удаляющейся западной полусфере, Земля будет находиться в точке B и в точке C в том случае, если вспышка видна в приближающейся восточной полусфере. В первый промежуток времени солнечные протоны быстро распространяются в межпланетном пространстве. Они достигают земной орбиты вначале в точке B, а затем в точке A, поскольку они движутся вдоль силовых линий межпланетного магнитного поля. В этот начальный период в точке C протоны не наблюдаются.

Примерно через 12 ч после вспышки солнечная плазма и генерированная в ней ударная волна проходят половину расстояния до Земли. Релятивистские солнечные протоны распространяются во внешнюю межпланетную среду. Как ударная волна, так и движущаяся вперед плазма замедляются и пересекают земную орбиту примерно через 40—50 ч после вспышки (рис. 24, *в*).

На рис. 25 показано пересоединение геомагнитных силовых линий и силовых линий межпланетного магнитного поля в разных секторах межпланетного магнитного поля

Рис. 24. Схема, иллюстрирующая последовательные стадии возмущения межпланетной среды, обусловленного солнечной бурей

а — 10—30 мин; *б* — 12 ч, *в* — 40—50 ч после вспышки. *F* — локализация вспышки на диске Солнца

1 — солнечные протоны с энергией >1 ГэВ, *2* — ≥ 40 мэВ; *3* — ≤ 15 мэВ

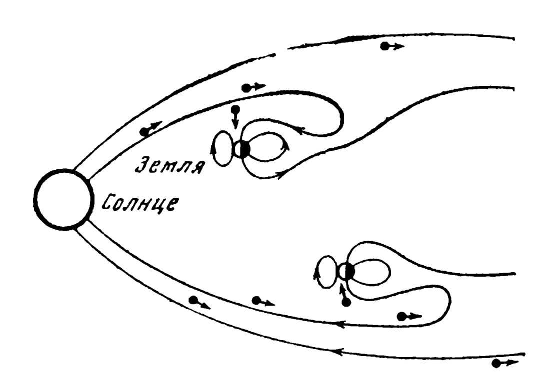


Рис. 25. Схема, показывающая пересоединение геомагнитных силовых линий и силовых линий межпланетного магнитного поля, когда Земля находится в положительном секторе (вверху) и отрицательном секторе (внизу) межпланетного магнитного поля

Стрелками с точкой около силовых линий показано направление движения солнечных электронов

(положительном и отрицательном), а также дано направление движения солнечных электронов.

При прохождении фронта ударной волны мимо Земли магнитосфера «погружается» в солнечный ветер. Солнечный ветер имеет повышенные значения скорости, плотности и температуры. Это приводит к внезапному сжатию магнитосферы. Магнитометры на поверхности Земли регистрируют в это время внезапное увеличение горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Это и есть начало геомагнитной бури. Примерно в это же время вне магнитосферы и в полярных областях часто наблюдается сильное увеличение солнечных протонов низкой энергии.

Когда ударная волна, несущая облако плазмы, действует на магнитосферу, последняя становится неустойчивой. Во внешней магнитосфере образуется большой поток частиц с большой энергией. На этой стадии растут и затухают системы интенсивных электрических токов, которые вызывают магнитосферные возмущения.

Рассмотрим, какие процессы в околоземном пространстве происходят, когда электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца действует на магнитосферу и атмосферу Земли.

Электромагнитное излучение Солнца, приходящее к Земле во время солнечных бурь, воздействует на земную

атмосферу примерно через 10 мин после солнечных явлений. После момента подхода быстрых частиц к орбите Земли магнитосфера в течение нескольких дней оказывается окруженной потоком энергичных частиц. Часть из этих частиц проникает в верхнюю атмосферу в высоких широтах северного и южного полушарий.

Вслед за энергичными частицами, которые быстро распространялись в межпланетном пространстве, следует облако солнечной плазмы, которое пересекает межпланетное пространство со скоростью ~500—1000 км/с. Как уже говорилось, в солнечном ветре генерируется ударная волна, несколько опережающая плазменное облако. Когда межпланетная ударная волна и солнечная плазма сталкиваются с магнитосферой Земли, наступает магнитосферная буря. Магнитосфера Земли погружена в непрерывно изменяющееся межпланетное магнитное поле, которое имеет секторную структуру. Она обусловлена тем, что в различных частях солнечного диска развиваются и затухают несколько центров активности. В каждой секторной структуре систематически изменяются плотность солнечного ветра, его скорость и напряженность магнитного поля.

Магнитосферная буря состоит из трех периодов или фаз. Как уже отмечалось, она начинается, когда межпланетная ударная волна достигает магнитосферы и очень быстро сжимает ее. Эффект сжатия магнитосферы Земли отчетливо проявляется в вариациях геомагнитного поля в виде резкого увеличения его напряженности как на поверхности Земли, так и в магнитосфере. После сжатия магнитосферы наступает начальная фаза магнитосферной бури. Это относительно спокойный период, продолжающийся несколько часов. В это время магнитосфера окружена солнечным ветром, параметры которого меняются под действием ударной волны.

Но вот магнитосферы достигает главное облако плазмы, породившее ударную волну. Начинается главная фаза магнитосферной бури, которая характеризуется последовательностью взрывоподобных процессов. Последние называются магнитосферными суббурями.

В случае если Земля окружена потоком плазмы, в котором магнитное поле имеет южную составляющую, происходит пересоединение межпланетных и геомагнитных силовых линий. Это приводит к появлению электрического поля E, направленного поперек хвоста магнитосферы с утренней стороны на вечернюю. Поскольку поток плазмы

имеет турбулентный характер, то должна появиться серия суббурь. Под действием возникшего интенсивного электрического поля плазма, находящаяся в хвосте магнитосферы, начинает двигаться в направлении к Земле. Из хвоста магнитосферы вытекает электрический ток. Сначала он течет вдоль магнитных силовых линий в утренний сектор овала полярных сияний, затем — вдоль полуночного сектора овала и вдоль силовых линий магнитного поля вытекает из вечерней части овала и оттуда — обратно в хвост магнитосферы. В описанных движениях плазмы (конвекция к Земле и токи вдоль силовых линий) происходит ускорение частиц плазмы. Энергия частиц увеличивается. При этом возникает плазма с температурой 10^7 К или даже больше. Часть ее вторгается в верхнюю атмосферу Земли в высоких широтах, а другая — заполняет плазменный слой.

Образованная таким путем горячая плазма частично впрыскивается в области захвата в магнитосфере, где образует протонный пояс или так называемый кольцевой ток, а также внешний радиационный пояс (электронный). Если магнитосферные суббури протекают довольно часто друг за другом, то протонный пояс оказывается весьма интенсивным. Протоны в этом поясе дрейфуют вокруг Земли с востока на запад (это дрейф за счет кривизны магнитных силовых линий Земли). Магнитное поле этого кольцевого электрического тока на поверхности Земли (в районе экватора) направлено против геомагнитного поля.

В такие моменты магнитометры на Земле регистрируют уменьшение горизонтальной составляющей геомагнитного поля в низких и средних широтах. В высоких — происходит инжекция плазмы в верхнюю атмосферу. Последнее вызывает появление полярной суббури. Интенсивный электрический ток, появляющийся вдоль овала полярных сияний (полярная электроструя), есть не что иное, как ионосферная часть тока из хвоста магнитосферы. Он вызывает полярные магнитные суббури и является основным индикатором и количественным показателем, характеризующим магнитосферную суббурю. Обычно применяются индексы AE, AU и AL, которые выводятся из вариаций горизонтальной составляющей геомагнитного поля на магнитных обсерваториях, расположенных в зонах полярных сияний.

После внезапного начала магнитной бури (в начальную ее фазу) в полярных областях, особенно около геомагнит-

ной широты 80°, в полуденном секторе освещенного полушария наблюдается существенное увеличение геомагнитной активности. На этой широте в полдень отмечаются интенсивные возмущения магнитного поля даже тогда, когда они отсутствуют в полуночном секторе овала полярных сияний.

Главная фаза магнитосферной бури характеризуется не только уменьшением горизонтальной составляющей в средних широтах, но и частым появлением полярных магнитных возмущений.

Мы уже говорили, что магнитосферная буря «питается» целой серией полярных магнитных суббурь. Если величина авроральной электроструи не очень велика ($\sim 500\ \gamma$), то даже при очень частых проявлениях интенсивность буревой (D_{st}) вариации не превышает 50—70 γ. Наблюдение высоких значений буревой D_{st} вариации ($\sim 100\ \gamma$) возможно при $AE \geqslant 1000\ \gamma$.

ФОРМЫ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Полярные сияния поражают разнообразием форм, быстрой изменчивостью и подвижностью. Имеется несколько удачных описаний полярных сияний очевидцами, но и они не передают всей грандиозности явления. Они способны только вызвать картины полярных сияний у тех, кто их уже видел. Поэтому здесь мы не беремся описывать все сложное явление — полярное сияние в его динамике, изменчивости и разноцветности. Но каждое самое сложное полярное сияние можно представить состоящим из отдельных «простых» форм, своего рода кирпичиков.

Основные формы полярных сияний (см. рисунки на вклейке):

1. Спокойная однородная дуга или полоса.
2. Лучи полярных сияний.
3. Диффузные и неправильные святящиеся пятна.
4. Большие однородные светящиеся поверхности.

Такое деление основано не только на видимых формах свечения, но и на тех физических причинах, которые их вызывают.

В 1963 г. был издан последний Международный атлас полярных сияний, составленный на основе большого экспериментального материала, накопленного, в частности, за период Международного геофизического года (МГГ)

1957—1958 гг. В этом атласе содержится описание различных форм полярных сияний и их классификация. Очень кратко суть этих описаний сводится к следующему.

Спокойная однородная дуга, так же как и полоса, простирается через весь небосвод и имеет форму прямой или несколько изогнутой линии. Направление этой линии обычно примерно совпадает с магнитной параллелью, т. е. с направлением восток—запад. Правда, в полярных шапках поближе к геомагнитным полюсам спокойные однородные дуги направлены вдоль линий полдень—полночь. Однородные дуги полярных сияний по длине могут достигать более тысячи километров при ширине их от одного километра и менее до нескольких десятков километров.

В спокойных условиях однородная дуга — основная форма свечения в зоне полярных сияний. С наступлением возмущений формы полярных сияний существенно усложняются, резко меняется их интенсивность и подвижность. Интенсивность свечения усиливается при высыпании в верхнюю атмосферу высоких широт потоков электронов. Чем больше энергия потока электронов, тем интенсивнее свечение. Более высокоэнергичные электроны способны глубже проникнуть в атмосферу и вызвать там свечение. Поэтому от энергии электронов зависит высота, на которой видны полярные сияния.

Но электроны потока высыпающихся частиц имеют неодинаковую энергию, а характеризуются определенным распределением по энергиям, или, как говорят, определенным энергетическим спектром. Ясно, что от энергетического спектра высыпающихся электронов будет зависеть и распределение свечения по высоте. Потоки высыпающихся частиц (электронов и протонов) во время возмущений очень изменчивы как по интенсивности, так и по энергетическому спектру. Кроме того, места их высыпания быстро изменяются с развитием возмущения. Все это и является физической причиной изменчивости форм полярных сияний, их высоты и динамики.

По мере наступления возмущения спокойные дуги полярных сияний теряют свою правильную геометрическую форму и превращаются в формы, похожие на спирали и вихри.

На небосводе часто наблюдаются кратные дуги — двойные, тройные или вообще мультиплетные. Интересно, что они никогда не пересекаются друг с другом, хотя и могут располагаться друг от друга очень близко.

С дугами полярных сияний тесным образом связаны электрические токи, которые текут вдоль геомагнитных силовых линий из магнитосферы в ионосферу и обратно из ионосферы в магнитосферу. (Продольные токи в самой ионосфере под длинной и яркой однородной дугой полярного сияния могут достигать сотен тысяч ампер.) Имеется замкнутая система этих продольных электрических токов (замыкание происходит в ионосфере на высотах вблизи 100 км), которая во многом определяет связь ионосферы, а значит, и полярных сияний, с магнитосферой и дальше — с межпланетным магнитным полем и солнечными бурями. Как видим, продольные токи играют очень важную роль во всей цепи солнечно-земных связей.

В принципе однородная дуга является частным случаем однородной полосы. Последняя не имеет правильной структуры, хотя, так же как и дуга, сильно вытянута. Обычно однородная полоса полярного сияния изогнута в виде латинской буквы *S* или же закручена в форме спирали.

Полосы и дуги полярных сияний чаще всего появляются на высотах между 100 и 150 км.

Лучи полярных сияний представляют собой узкие пучки света длиной от нескольких десятков до нескольких сотен километров и шириной от нескольких десятков метров до нескольких километров.

Лучи полярных сияний появляются на тех же высотах, что и полосы и дуги, т. е. на 100—150 км. Они возникают либо изолированно друг от друга, либо целыми «связками». В том и другом случае лучи располагаются вдоль геомагнитных силовых линий, которые, как уже говорилось, направляют движение частиц, вызывающих полярные сияния. Последним и объясняется такое направление лучей. Когда лучи полярных сияний наблюдаются над головой, т. е. в зените, то они смотрятся как своего рода корона.

Дело в том, что из-за перспективы геомагнитные силовые линии кажутся наблюдателю сходящимися в магнитном зените. Магнитный зенит — это та точка небесной сферы, в которую силовые линии геомагнитного поля для данного места наблюдения проектируются.

В возмущенных условиях лучи полярных сияний видны в сочетании с полосами и дугами полярных сияний.

Диффузные пятна полярных сияний занимают на небе площадь около 100 км^2. Само название их говорит об их

неправильной форме. Как правило, наблюдается одновременно много таких пятен.

Однородные светящиеся поверхности занимают большую часть небосвода (недаром их называют «большими») и имеют вид довольно постоянного свечения, которое чем-то напоминает вуаль. Эту форму свечения называют еще фоновым свечением.

Конечно, когда полярное сияние в разгаре, в активной фазе возмущений, мы можем зафиксировать сразу несколько или даже все его формы. При этом различные формы накладываются друг на друга или же внедряются друг в друга. Например, дуги и полосы полярных сияний часто имеют лучистую структуру. Каждая форма движется, и излучение меняет свою интенсивность во времени. Скорости движения спокойных форм полярных сияний достигают 50 км/с.

Мы описали четыре классические формы полярных сияний. Но реальные сияния более разнообразные. Так, известны пульсирующие полярные сияния, интенсивность свечения которых изменяется (пульсирует) во времени весьма быстро. Они появляются главным образом после активной фазы развития сияния. За каких-то несколько секунд интенсивность свечения может измениться в десятки и более раз. Такие пульсации свечения можно иногда наблюдать невооруженным глазом.

В отличие от полос, дуг и лучей, которые видны выше 100 км, пульсирующие сияния появляются ниже этого уровня. Интересно, что они сопровождаются такими же пульсациями в магнитном поле Земли. Это объясняется причиной, единой для тех и других пульсаций,— вторжением заряженных частиц в верхнюю атмосферу.

Пульсирующие полярные сияния также бывают различные — собственно пульсирующие, пламенные, мерцающие и струящиеся. Такие живописные описания связаны с ассоциациями, которые они вызывают у наблюдателя. Собственно пульсирующие сияния характерны тем, что их яркость по всей площади свечения изменяется синфазно, т. е. одинаково.

Когда на небосводе появляются своего рода волны света, которые быстро движутся к магнитному зениту, то такие сияния называются пламенными (они подобны движению пламени). Значительно реже можно наблюдать, как эти волны света движутся обратно, т. е. от зенита.

Пламенные сияния возникают в то время, когда возмущение уже затухает, т. е. в периоды после распада форм полярных сияний. Они движутся от уровня 100 км вверх (или реже вниз) со скоростями, достигающими 100 км/с. Правда, были измерены и весьма экзотические скорости их движения, достигающие 1000 км/с. Часто после пламенного сияния наблюдается корона, описанная выше.

Считается, что видимость движения областей свечения вверх связана со своеобразной последовательностью прихода в атмосферу потоков заряженных частиц, вызывающих свечение. Вначале внизу наблюдается свечение, связанное с частицами бóльших энергий. Затем оно появляется все выше и выше, куда уже приходят частицы меньших энергий и поэтому запаздывающих. С поверхности Земли это будет восприниматься как волнообразное движение свечения вверх. Однако объяснить таким образом движение областей свечения от магнитного зенита вниз нельзя.

Третий тип пульсирующего полярного сияния — это мерцающие сияния, при которых яркость свечения как будто мерцает. Изменения яркости сияния быстрые и неправильные. Этот тип полярного сияния наблюдается в зонах полярных сияний и областях, примыкающих к ним со стороны более низких широт (т. е. в субавроральных зонах).

Мерцающие пятна имеют размер 1—5 км. Мерцания яркости происходят с частотой 10 Гц. Такие мерцающие сияния обычно проявляются в пределах ярких однородных дуг или полос, для которых характерны быстрые внутренние движения со скоростью более 5 км/с.

Мерцающие полярные сияния в южном и северном полушариях (на геомагнитных широтах 63—68°) являются геомагнитно сопряженными, т. е. наблюдаются одновременно в областях на юге и севере, которые связаны между собой (т. е. сопряжены) геомагнитными силовыми линиями. Характер свечения в этих областях одинаковый.

Четвертый тип пульсирующего полярного сияния называется струящимся. Яркость этих сияний изменяется беспорядочно. Ее неправильные вариации быстро распространяются вдоль однородных дуг в горизонтальном направлении. Интересно, что форма самой дуги или полосы при этом не меняется. Уярченная часть дуги или полосы полярного сияния перемещается вдоль формы в виде волны. Как будто солнечный зайчик бежит вдоль дуги сияния.

Струящиеся пульсирующие сияния наблюдаются во

время распада сияний. Иногда видны горизонтальные волны в форме вытянутых с востока на запад дуг, движущихся в направлении к экватору со скоростью 50—300 км/с. Такой характер движения имеет место только в послеполуночные часы и только в том случае, если предшествующий день и вечер были спокойными. Но после этих горизонтальных волн свечения наступает кратковременная полярная суббуря.

Характеристики этой формы полярного сияния следующие: яркость их изменяется с частотой 1 Гц, интенсивность излучения на длине волны 4278 Å менее 1 килорэлея. Толщина этой формы сияния составляет 30—120 км, и они перемещаются на расстояния 150 км и более. Пульсирующие дуги полярных сияний появляются на тех же высотах, что и спокойные дуги. Если интенсивность свечения усиливается, то само сияние появляется ниже.

Было установлено, что общие вариации амплитуды интенсивности пульсирующих сияний очень тесно связаны с микропульсациями магнитного поля. В течение 60% времени, когда наблюдаются пульсирующие полярные сияния, пульсации яркости и микропульсации магнитного поля совпадают. Часто отмечается полное совпадение пиков флуктуаций в сияниях и геомагнитном поле.

Такое полное совпадение чаще всего имеет место в периоды правильных пульсирующих сияний и тогда, когда такие периоды разделены последовательностями неправильных флуктуаций.

Временные вариации пульсирующих сияний лучше всего регистрируются фотоэлектрическими фотометрами с линейной характеристикой в очень широком динамическом диапазоне и высокой чувствительностью. Для определения формы пульсирующих сияний применяются телевизионные камеры, хотя линейность и динамическая амплитуда этих установок ограничены по сравнению с обычным фотометром.

Известны пульсирующие сияния особого, более редкого типа. Они характеризуются затухающими колебаниями с одним сильным пиком (максимумом) и с последующими пятью или восемью импульсами с все уменьшающейся амплитудой. Интервал времени между соседними импульсами во всех конкретных случаях постоянный (от 1 до 3 с).

В средних широтах также бывают полярные сияния. Это так называемые красные дуги, или *М*-дуги. Из названия ясно, что свечение видно в красном цвете, монохрома-

тично (одноцветно) в красных линиях с длинами волн 6300 и 6364 Å. Эти сияния наблюдаются выше, чем сияния в высоких широтах,— на высотах от 300 до 700 км.

Красные дуги по широте могут достигать 600 км, а интенсивность их свечения в линии 6300 Å обычно составляет 1—10 kR. Эту интенсивность нельзя фиксировать невооруженным глазом: она ниже порога его видимости. Протяженность красных дуг в направлении восток—запад достигает нескольких тысяч километров, а иногда они, видимо, простираются вокруг всей Земли. Они появляются одновременно в обоих полушариях и тесно связаны с геомагнитной и солнечной активностью. Красные дуги могут существовать в течение целых суток.

Полярные сияния в полярной шапке выделяют в отдельный тип. Эти сияния, охватывающие обширное пространство в высоких широтах, вызваны солнечными космическими лучами с энергиями 1—100 МэВ и тесно связаны с поглощением радиоволн в полярной шапке (ППШ). Это понятно, поскольку те же потоки солнечных космических лучей, которые способствуют возникновению полярных сияний, образуют повышенную ионизацию нижней ионосферы, ответственную за поглощение радиоволн.

Свечение в полярной шапке (во время ППШ) является однородным и занимает всю полярную шапку вплоть до 60° (по широте). Известно, что явление ППШ длится несколько суток. В течение первых суток после начала ППШ интенсивность свечения увеличивается, а затем в течение нескольких последующих суток постепенно спадает. Максимальная интенсивность свечения на длине волны 3914 Å достигает 10 kR, а у свечения на длине волны 5577 Å она в пять раз меньше.

Такое распределение интенсивностей свечения на этих двух линиях характерно только для полярного сияния в полярной шапке во время ППШ и не имеет места в овале полярных сияний. Оно вызвано тем, что солнечные космические лучи (протоны и альфа-частицы, т. е. ядра гелия) производят ионизацию и возбуждение в основном на высотах 30—80 км, где плотность атмосферы намного больше, чем в областях свечения в овале полярных сияний, т. е. на 100 км и выше. Поэтому из-за большой плотности на низких высотах происходит быстрая дезактивация возбужденных атомов кислорода (которые образуются при прямой диссоциации молекулярного кислорода или диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов кислорода). По

этой причине на этих высотах (менее 80 км) почти все излучение с длиной волны 5577 Å гасится.

Во время сияния, связанного с ППШ, происходит излучение не только с длиной волны 3914 Å, но и с другими длинами волн, которые регистрируются и в овале полярных сияний. Однако эти эмиссии пока что детально не исследованы.

Диффузные полярные сияния часто простираются по всему небу, достигая максимальной интенсивности в утренние и дневные часы. Диффузные сияния в зоне полярных сияний называют мантийными сияниями. Их пространственное распределение отличается от распределения дискретных форм сияний, таких, как дуги, полосы и лучи. Мантийные сияния появляются наиболее часто при максимальной солнечной активности и намного реже при минимальной. Размеры области диффузного свечения заметно не меняются с усилением магнитной активности. С увеличением магнитной активности возрастает только интенсивность свечения и величина утреннего максимума.

Кроме описанных выше форм полярных сияний, были предложены и некоторые другие (не вошедшие в Международный атлас):

Лист — полярное сияние имеет такую же форму, как и дискретная дуга, но характеризующуюся так называемой «тонкостью». Такие тонкие дуги, имеющие форму тонкого листа S, типичны для вечернего сектора на границе овала полярных сияний со стороны полюса.

Широкая же дуга со слабым свечением была названа диффузной дугой. Такие дуги часто появляются вместе с дугами — листами.

Имеется полярное сияние, по своей форме напоминающее дым сигареты. Оно так же дрейфует и вращается и названо «дымом». В дыме нередко различима тонкая структура сияния, но она проглядывается не так часто, как в дискретной дуге. Дымчатое сияние обычно появляется вблизи границы свечения.

Выделяют еще полоски или бороздки. Эти сияния выглядят как диффузные дуги, если полосчатость в них меняется очень быстро.

Бывают еще «сияния наоборот», т. е. четко выраженные области «пустот», в которых отсутствуют какие-либо излучения и которые вкраплены внутри полярных сияний. Такие области без полярных сияний получили название «черные полярные сияния». Они имеют форму тонких лент

или вытянутых эллиптических отверстий и дрейфуют в восточном направлении после полуночи и в западном направлении до полуночи. Эти формы полярных сияний возникают при переходе от диффузных сияний к дискретным. Можно считать, что они являются промежуточными формами.

Изучение полярных сияний с помощью более совершенной аппаратуры, которая позволяет фотографировать их за более короткое время экспозиции и поэтому регистрировать сияния меньшей интенсивности, показало: все формы полярных сияний имеют еще и тонкую структуру. Стали более ясными переходы одной формы сияния в другую, а также их изменение во времени.

В настоящее время для исследования полярных сияний используются многоканальные телевизионные системы. Такой аппаратурой были зарегистрированы скорости движения сияний до 10 км/ с. Было установлено, что вертикальная протяженность пульсирующих сияний меньше 2 км, а максимальная их интенсивность не превышает 10 kR в полосах 4278 Å.

Часто наблюдаются полярные сияния в виде спиралей, которые разворачиваются по часовой стрелке, если смотреть с Земли вдоль магнитных силовых линий. Диаметр спиралей меняется от 20 до 1300 км, наиболее типичные размеры 250—500 км. Спирали видны в вечерние и полуночные часы.

Кроме спиралей бывают также завитки. В последних силовые линии остаются параллельными друг другу, тогда как спираль сопровождается изменениями ориентации магнитных силовых линий. Завитки намного меньше спиралей и закручены в противоположную сторону. В одних и тех же формах полярных сияний могут наблюдаться как спирали, так и завитки.

Считается, что спирали обусловлены продольными электрическими токами, которые текут вдоль геомагнитных силовых линий между ионосферой и магнитосферой. Завитки, видимо, обусловлены тем, что в центре каждого из них имеется избыток отрицательных электрических зарядов.

По мере того как полярные сияния становятся более активными, возникает вращение по часовой стрелке, которое с увеличением интенсивности свечения приводит к образованию изгиба или оптического драпри. Дуги полярных сияний испытывают кручения, искривления, рас-

щепления и другие деформации. Они наблюдаются вдоль дуги с определенной периодичностью и с ними связаны разрушение и восстановление форм полярных сияний.

Остановимся подробнее на высотах полярных сияний.

Высота полярного сияния зависит от нескольких причин, и прежде всего от энергии заряженных частиц, которые вызывают сияния (электронов и протонов). Чем больше энергия этих частиц, тем глубже проникнут они в атмосферу Земли и вызовут свечение атмосферы — полярное сияние на меньших высотах. Еще один фактор, влияющий на высоту полярного сияния: какой именно газ (азот, кислород или водород) светится и в каких линиях? Таким образом, исследователям полярных сияний важно знать высотное распределение плотности атмосферы и концентрацию отдельных ее составляющих.

Самый простой и первый способ определения высоты полярного сияния был предложен еще в XVIII в. Речь идет о триангуляционном методе, по которому высота полярного сияния определялась на основании одновременных измерений углов возвышения над горизонтом одних и тех же точек полярного сияния. Измерения проводились из двух точек, разнесенных на 10—20 км. Возможности метода существенно увеличились, после того как стало возможным применение фотографирования с малыми экспозициями. Точность измерения высоты достигала 1—2 км.

За многие годы наблюдений полярных сияний накопился большой материал, позволяющий установить основные закономерности изменения высот полярных сияний. Прежде всего было установлено, что, чем интенсивнее свечение, тем меньше высота нижнего края сияния (рис. 26). Средняя высота нижнего края дуг и полос полярных сияний различной интенсивности (слабой, средней, сильной и очень сильной) составляют 114,8, 108,0, 99,3 и 94,7 км соответственно. Высота нижнего края дуг полярных сияний с интенсивной красной окраской нижнего края (тип B) равна 65—70 км.

Нижний предел высот полярных сияний в их зоне составляет 95—110 км. В дневной части овала полярных сияний свечение наблюдается на бóльших высотах, чем в ночной его части.

Высота полярных сияний зависит также от широты. На разных широтах также различны полная интенсивность сияния и частота его появления. Лучи полярных сияний, которые обычно наблюдаются высоко в атмосфере, чаще

появляются в высоких широтах, чем в более низких. Зато в последних более часты пульсирующие сияния. Можно сказать, что по мере перехода от высоких широт к более низким форма сияний меняется от лучистых дуг к драпри.

С ростом геомагнитной широты средняя высота полярных сияний увеличивается. На широтах 75—76° высоты полярных сияний составляют 145—180 км с максимумом около 175 км. На широте 68° средняя высота максимума свечения в спокойных дугах сияний равна 120 км, а на 72° —164 км.

На рис. 27 показана зависимость высоты спокойных дуг полярных сияний от широты, полученная по большому количеству наблюдений в северном полушарии. Видно, что к северу и к югу от широты 63—65° высота дуг увеличивается. Это увеличение больше в направлении к полюсу, чем к экватору.

Верхний предел полярных сияний определяется с меньшей точностью. Он также различен для разных форм полярных сияний. Так, верхний предел лучей много больше, чем верхний предел других форм сияний.

Лучи полярного сияния, освещенные Солнцем (перед заходом или после восхода), наблюдаются на высотах между 200—400 км и 1000—1100 км.

Высоты полярных сияний в низких широтах измерялись

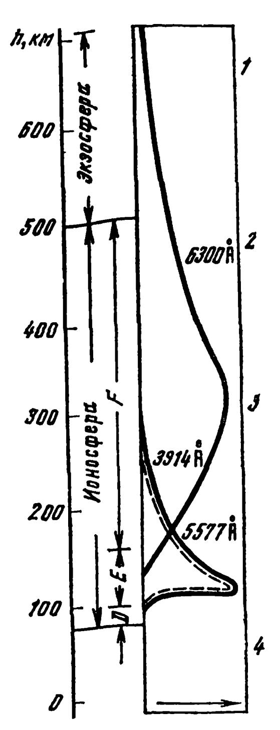


Рис. 26. Высотное распределение яркости (интенсивность свечения) полярных сияний четырех типов

1 — лучи; 2 — драпри; 3 — лучистые дуги; 4 — однородные дуги. D, E, F — области ионосферы

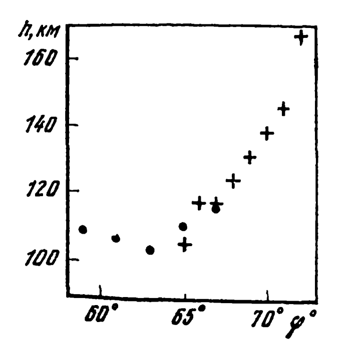


Рис. 27. Зависимость высоты полярных сияний от широты

редко. Имеющиеся немногие данные говорят о том, что там эти величины выше, чем в овале полярных сияний. Они могут достигать 1000 км (см. рис. 27).

ПРОТОННЫЕ ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Особо выделяют полярные сияния, которые вызываются протонами. Их свойства во многом отличаются от рассмотренных выше форм электронных полярных сияний.

Когда пучок высокоэнергичных протонов входит в атмосферу, их энергия постепенно уменьшается вследствие неупругих столкновений, при которых происходит ионизация и возбуждение молекул и атомов атмосферных газов. В некоторых ионизационных процессах протон может захватить свободный электрон и таким образом превратиться в нейтральный атом водорода. Этот процесс называется перезарядкой. Атом водорода может возникать или в основном или в каком-либо возбужденном состоянии.

Когда возбужденный атом водорода переходит в основное или метастабильное состояние $2S$, в результате нескольких каскадных переходов, его излучение возможно в линиях серии Бальмера $\alpha(3-2)$ и $\beta(4-2)$, а также с длинами волн H_α 6563 Å и H_β 4861 Å.

Некоторые особенности протонных (водородных) полярных сияний вызваны особым характером движения протонов — атомов водорода. Первоначальный протон в своем движении направляется силовыми линиями геомагнитного поля. Когда протон превращается в атом водорода, его движение больше не ограничивается магнитным полем и он может далеко уйти от направления движения первоначального протона. Затем атом водорода при столкновении с другой частицей вновь теряет свой электрон (т. е. ионизуется) и превращается в протон. Снова его движение направляется магнитным полем.

Протоны и атомы водорода испытывают большое число столкновений, сопровождающихся перезарядкой, прежде чем растратят полностью свою энергию и затормозятся. Меняется и состав пучка протонов — атомов водорода по мере его проникновения в атмосферу.

Поскольку излучающие атомы водорода движутся с достаточно большой скоростью, то длина волны их излучения несколько изменяется вследствие эффекта Доплера. Напомним, что сам эффект состоит в том, что если источник

волн приближается к наблюдателю (или удаляется от него), то последний регистрирует уменьшение (или увеличение) длины волны по сравнению с длиной волны того же излучателя, когда он неподвижен.

Таким образом, при движении атомов водорода к Земле спектральные линии, регистрируемые с земной поверхности, будут смещены в сторону более коротких длин волн. Для примера скажем, что линия H_β 4861 Å обычно смещается примерно на 5 Å. Это смещение измеряется, и информация используется для определения параметров пучка протонов — *атомов водорода*.

По мере своего продвижения в глубь атмосферы пучок протонов — атомов водорода постепенно расползается за счет выхода из-под контроля магнитным полем атомов водорода. Происходит своего рода диффузия поперек пучка. Но когда частицы попадают в более плотные слои атмосферы, то величина этой диффузии быстро уменьшается.

Процесс перезарядки состоит из ряда процессов, которые можно записать в виде

$$H^+ + M \to H(nl) + M^+,$$

где n и l — орбитальное и азимутальное квантовое число соответственно. Реакции имеют различные эффективные сечения $\sigma_{10}(nl)$ для захвата электрона на разные уровни nl.

Возбуждение может происходить при непосредственном столкновении атомов водорода в основном состоянии с атомами и молекулами атмосферных газов (M):

$$H(10) + M \to H(nl) + M$$

или

$$H(10) + M \to H(nl) + M^+ + e$$

с эффективным сечением $\sigma_{10}(nl)$.

При вторжении пучка протонов — атомов водорода реакции

$$H + N_2 \to H + N_2^+ + e, \qquad H + N_2 \to H^+ + N_2^+ + 2e$$

играют столь же важную роль, как и реакции

$$H^+ + N_2 \to H^+ + N_2^+ + e, \qquad H^+ + N_2 \to H + N_2^+.$$

На один акт ионизации теряется энергия около 36 эВ независимо от первоначальной энергии ионизующей частицы.

Вторичные электроны имеют энергию, достаточную для

того, чтобы также давать вклад в ионизацию и возбуждение. Этот процесс более эффективен при более низких энергиях.

Тот факт, что энергичные протоны, вторгающиеся в верхнюю атмосферу и являющиеся причиной протонных (водородных) полярных сияний, часть своего пути двигаются как нейтральные атомы водорода, влияет на расположение тех областей, где видны протонные сияния. Свободные от влияния магнитного поля Земли ядра водорода, имея относительно большие скорости протонов, способны проникнуть в те области, куда протоны, нанизанные на силовые линии, не могли бы проникнуть. Это значит, что мы не вправе соединять области свечения вдоль геомагнитных силовых линий с областями магнитосферы, откуда должны поступать заряженные частицы, вызывающие сияния. Это можно делать в случае электронных сияний, так как электроны движутся все время вдоль силовых линий. Протоны же благодаря своему периодическому превращению в атомы водорода на время освобождаются от влияния магнитного поля Земли. Вследствие этого области, где наблюдаются протонные полярные сияния, очень протяженны.

В дополуночное время обычно интенсивные водородные эмиссии наблюдаются в более низких широтах, чем электронные полярные сияния. Области водородной эмиссии не отображают мест первоначального вторжения протонов: они создаются разлетающимися во все стороны нейтральными атомами водорода после первой же перезарядки вторгающихся протонов.

Эмиссия водорода более интенсивна в низкоширотной области, чем в высокоширотной. Этот факт можно объяснить тем, что большинство протонов движутся под большими углами к геомагнитным силовым линиям, т. е. под большими питч-углами. В этом случае из-за наклона геомагнитной силовой линии относительно вертикали наибольшее число атомов водорода поглотятся в низкоширотной области. Атомы же водорода, разлетающиеся в сторону высоких широт, будут убегать из атмосферы в околоземное пространство.

Водородная эмиссия не появляется в областях наиболее интенсивных электронных полярных сияний с подвижными лучистыми образованиями. Как правило, интенсивная водородная эмиссия отмечается в зоне полярных сияний во время спокойных геомагнитных условий. Нет осно-

ваний считать, что она является предшественницей геомагнитных бурь и суббурь. Однако в области более низких широт водородная эмиссия наблюдается только во время магнитных бурь, хотя ее интенсивность и не бывает там столь большой, как в зоне полярных сияний.

Самая обычная форма протонных полярных сияний — довольно широкая дуга, вытянутая в направлении с востока на запад. Протонная дуга очень широка в направлении с севера на юг (от 3 до 10° или от 300 до 1000 км). Интенсивные линии водорода часто видны в диффузных пятнах, но отсутствуют в более или менее дискретных формах.

Взаимосвязь между протонными и электронными сияниями весьма сложна. В некоторых случаях сияния представляют собой чисто протонную дугу. В других случаях они, по-видимому, являются результатом совместных протонных и электронных вторжений. Происходит уменьшение интенсивности линии водорода, когда полярное сияние становится активным. По наблюдениям в Антарктиде (70° S геомагнитной широты) излучение линии H_α всегда предшествует излучению полос первой положительной системы в фазе распада.

Мы описывали овал полярных сияний, который был построен по данным об электронных сияниях. Делались попытки получить такой же овал по данным о протонных полярных сияниях. При этом выяснилось, что появление и интенсивность линий водорода связаны с ориентированной на Солнце геомагнитной системой координат. Однако построить такой овал оказалось трудно из-за недостаточности однородного наблюдательного материала. Была получена овальная водородная зона с центром приблизительно в 25° от геомагнитного полюса на дневной стороне, сильно смещенная к полюсу на ночной стороне. Данные измерений на спутниках потоков протонов находятся в приемлемом согласии с этим построением. Вместе с тем они свидетельствуют о двойном пике на дневной стороне, указывающем на то, что две части овала, расположенные на вечерней и утренней сторонах, не пересекаются или что овал расщепляется. Результаты наземных измерений в Антарктиде на ночной стороне также согласуются с этой картиной.

Изучение спектрограммы линий H_α за период 1964—1965 гг. показало, что центр овала протонного сияния находится на несколько градусов ближе к экватору по сравнению с электронным овалом (отдельные сияния) до

полуночи, и они пересекаются несколько ближе к полюсу после 1 ч местного геомагнитного времени.

Средние зоны вторжения протонов и электронов значительно перекрываются. С усилением магнитной активности водородная зона распространяется к экватору и намного увеличивается в максимуме интенсивности. Выше геомагнитной широты 70° интенсивность водородных эмиссий слабо зависит от геомагнитной активности. При низком уровне последней интенсивность линии водорода довольно симметрична относительно геомагнитной полуночи. При высоком уровне активности имеется максимум интенсивности, сильнее смещенный к экватору до полуночи.

По наблюдениям в Антарктиде за 1967 г. было установлено, что протонные полярные сияния по сравнению с сильными отдельными электронными сияниями всегда возникают ближе к экватору. Однако в утреннее время этот эффект в отличие от вечернего проявляется менее отчетливо. Протонное сияние ближе к электронному в утренние часы, нежели в полночь.

Видимо протяженность овала протонных сияний несколько меньше, чем электронных, при увеличении магнитной активности.

Изучение протонных сияний позволяет получать информацию о характеристиках вторгающихся протонов. Она хорошо дополняет данные о потоках протонов, полученных с помощью ракет и спутников.

Потоки протонов, которые вызывают протонные полярные сияния, имеют величину около 10^7 см$^{-2}$с$^{-1}$, а иногда доходят до 10^8 см$^{-2}$с$^{-1}$. Один протон излучает несколько фотонов в зависимости от энергии. При этом типичная интенсивность излучения линии H_β имеет величину 100 рэлей. Энергия протонов составляет 1—100 кэВ. Источником этих протонов является солнечный ветер.

Расчеты показали, что для характерной энергии между 5 и 50 кэВ максимум свечения приходится на диапазон высот примерно от 130 до 100 км и вертикальная полуширина составляет от 60 до 20 км. Высотное распределение водородных эмиссий довольно трудно измерять с Земли. В большинстве случаев водородная эмиссия простирается на несколько сотен километров в направлении север—юг и на тысячи километров в направлении геомагнитной параллели. Следовательно, во всех случаях для определения высотного распределения с достаточно высокой точностью необходимо использовать тщательно разработанный

метод параллактических измерений при помощи сканирующих фотометров.

Допплеровское смещение длины волны излучения атомов водорода происходит за счет движения самих излучающих атомов. Поэтому величина этого смещения содержит информацию о характере движения протонов (их скорости, т. е. энергии и распределения их по питч-углам). Правда, в настоящее время такому систематическому изучению мешает отсутствие в достаточном количестве экспериментальных данных. Но регулярные наблюдения профилей линий водорода могут дать информацию о пространственных и временных изменениях этих характеристик движения протонов.

Если линии H_α и H_β смещены соответственно на 22 и 16 Å, то допплеровская скорость равна 1000 км/с. Профили слабо меняются от одного сияния к другому.

Данные, полученные с помощью ИСЗ, говорят о том, что распределение по питч-углам протонов зависит от широты.

Профили линий водорода в магнитном зените указывают на существование излучения с длинноволновой стороны несмещенной линии. Это излучение обусловлено атомами водорода, которые движутся вверх от наблюдателя. Они имеют компоненту энергии, параллельной магнитному полю, около 1—3 кэВ. Было предположено, что простое смещение обусловлено протонами, отраженными в магнитной зеркальной точке. Но для этого необходимо, чтобы распределение по питч-углам для протонов низких энергий имело максимум вблизи 70—90° и было приблизительно изотропным для меньших углов. В настоящее время это пока еще экспериментально не подтверждено.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Распределение полярных сияний в зависимости от времени суток и широты исследовалось неоднократно. Вопрос оказался весьма сложным, поскольку на это распределение влияют одновременно несколько физических факторов. Основной из них — конфигурация магнитного поля Земли, т. е. магнитосферы, которая зависит от степени возмущенности, сезона, солнечной активности и пр. Зоны высыпания заряженных частиц (электронов и протонов), вызываю-

щие полярные сияния, меняют свое положение в зависимости от конфигурации магнитосферы. Что касается наличия высыпания этих частиц в верхнюю атмосферу Земли, то на него влияет выброс потоков плазмы из Солнца.

Именно зависимость частоты появления полярных сияний от многих факторов и была причиной продолжительных неудачных поисков закономерностей, которым подчиняются полярные сияния.

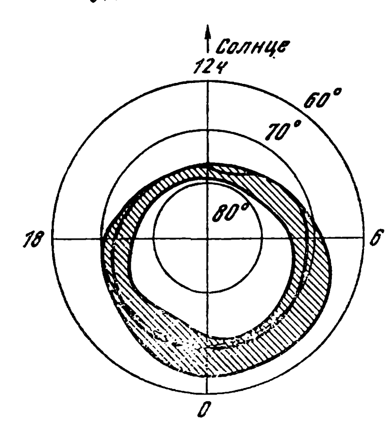


Рис. 28. Овал полярных сияний по Фельдштейну (заштрихованная область) и внешняя граница области захвата заряженных частиц (жирная линия)

Частота появления сияний 75—90%; поток захваченных электронов с E⩾40 кэВ 10^4 электрон/см² с

За период МГГ в 1957—1958 гг. на целой сети обсерваторий был накоплен большой экспериментальный материал, который позволил показать, что дуги полярных сияний наблюдаются не во всех высоких широтах, а в узком овальном поясе, окружающем геомагнитный полюс. Центр овала приблизительно на 3° смещен в ночную полусферу (рис. 28).

Овал полярных сияний фиксирован относительно Солнца. Земля в течение суток совершает один оборот под этим овалом. Наблюдатель на поверхности Земли в разные часы суток сможет видеть полярные сияния в разных областях: его расположение относительно овала будет постоянно меняться.

Зона полярных сияний была определена раньше. Это область, в которой полярные сияния в ночные часы наблюдаются более часто. Отсюда ясно, что в ночном секторе овал полярных сияний совпадает с зоной полярных сияний, но в дневные часы пройдет почти на 10° ближе к геомагнитному полюсу. Овал полярных сияний — это область, где сияния наблюдаются наиболее часто в один и тот же момент мирового времени. Другими словами, если наблюдатель будет регистрировать полярные сияния с точки, поднятой над геомагнитным полюсом, то он с достаточной высоты увидит замкнутую область свечения.

Магнитосфера делится на внутреннюю часть, в которой геомагнитные силовые линии являются замкнутыми, и внешнюю, где они разомкнуты. Заряженные частицы могут быть захвачены только внутренней частью магнитосферы. Из рис. 28 видно, что овал полярных сияний тесно связан с линией пересечения полярной ионосферы с внешней границей области захвата заряженных частиц.

Очевидно, что наиболее существенную роль играет не сама по себе геомагнитная или дипольная широта станции, а ее положение относительно овала полярных сияний. В разные часы мирового времени положение овала полярных сияний относительно географических пунктов меняется (рис. 29).

То, что мгновенная область появления полярных сияний является эксцентричным овалом, связано с асимметрией внутренней структуры магнитосферы в направлении день—ночь. Так же асимметричен внешний радиационный пояс, а линия пересечения его внешней границы с ионосферой примерно совпадает с овалом полярных сияний.

Область, которая находится ближе к полюсу от овала полярных сияний, называется полярной шапкой. Поскольку положение овала в разные часы мирового времени различное, то и полярная шапка не является раз навсегда заданной областью. Один и тот же географический пункт может в определенное время попадать в полярную шапку, затем в овал полярных сияний и даже выходить за пределы овала в сторону более низких широт.

Если четко представить себе описанную картину, связанную с положением овала полярных сияний и его вращением в течение суток, то можно понять тот факт, что суточная вариация частоты появления полярных сияний очень сильно зависит от положения станции наблюдения. Это обусловлено изменением в течение суток положения определенной станции относительно овала полярных сияний в течение суток. Станция зоны полярных сияний попадает в овал полярных сияний только в ночные часы, а в остальное время суток она смещена от овала в сторону меньших широт. Естественно, что на такой станции имеется только один максимум частоты появления полярных сияний именно в ночные часы.

Рассмотрим другой пример, когда станция расположена между широтами 70 и 75° Судя по рис. 28, эта станция пересекает овал полярных сияний дважды в сутки. Это значит, что в периоды этого пересечения частота поляр-

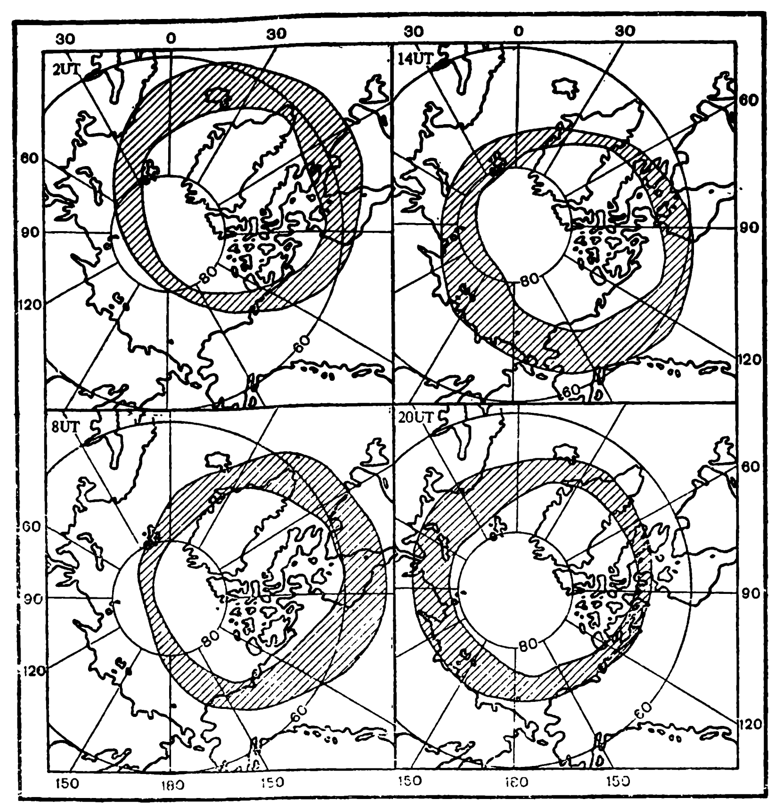


Рис. 29. Примерное положение овала полярных сияний в северном полушарии в различные моменты мирового времени UT (2, 8, 14 и 20 ч)

ных сияний достигнет максимальной величины, т. е. на этой станции в суточном ходе частоты появления полярных сияний будут наблюдаться два максимума. Этим и объясняется разнообразие в суточном ходе частоты появления полярных сияний на различных высокоширотных станциях.

Кроме овала полярных сияний, в утреннем секторе имеется и вторая область в виде полосы, которая простирается от полуночной части овала. Эта полоса расположена дальше от овала в сторону средних широт. Полярные сияния в этой полосе вызываются вторгающимися электронами. Эти электроны имеют бóльшие энергии, чем электроны, вторгающиеся вдоль овала полярных сияний. Имея

бо́льшую энергию, они проникают до меньших высот в область, где не создаются ионосферные токи. Поэтому связь этих полярных сияний в утреннем секторе с магнитными возмущениями очень слабая.

Полярные сияния, наблюдаемые в овале полярных сияний и вызываемые вторжением в эту область электронов, окружены диффузной полосой протонного полярного сияния. Источником этих протонов в полуночном секторе является кольцевой ток (а во время магнитосферной бури — протонный пояс).

Еще дальше в сторону средних широт в период интенсивных магнитных бурь наблюдаются среднеширотные красные дуги полярных сияний. Это свечение красной линии кислорода (λ=6300 Å). Область этого свечения имеет форму широкой полосы свечения.

Мы показали, что в различные часы мирового времени положение овала полярных сияний меняется. Но это происходит и в результате возмущения магнитного поля Земли, т. е. при различных магнитных условиях.

На рис. 30 хорошо видно, что при интенсивной магнитной буре овал сильно смещен по направлению к экватору. Жирной точкой указано положение станции наблюдения, которая в спокойных условиях находится вне овала полярных сияний (в сторону средних широт); во время умеренного возмущения эта станция попадает в овал полярных сияний, а при интенсивной буре — в полярную шапку. Ясно, что без анализа взаимного расположения станции наблюдения и овала полярных сияний трудно понять характер наблюдаемого свечения. Поэтому определение положения станции относительно овала полярных сияний должно проводиться непрерывно. Только так можно привести в систему обширные данные о полярных сияниях при различных уровнях магнитной активности.

Так как Солнце оказывает влияние на процессы, связанные с вторжением заряженных частиц, а следовательно, и с полярными сияниями, а геомагнитная широта определяет интенсивность потоков этих частиц, то наиболее естественными являются направление на Солнце и направление оси геомагнитного диполя. Исходя из этого целесообразно выбрать систему координат следующим образом: главная ось совпадает с осью геомагнитного диполя, а главной координатной плоскостью является плоскость, которая проходит через линию Земля — Солнце и через ось геомагнитного диполя.

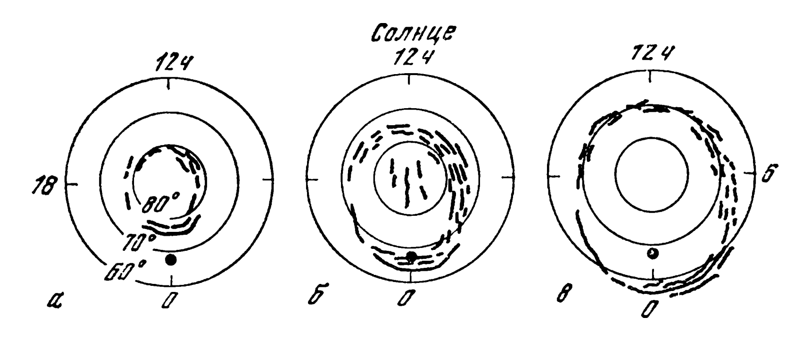


Рис. 30. Овал полярных сияний при различных магнитных условиях

а — в очень спокойный период; *б* — в умеренно возмущенный период; *в* — при интенсивной буре

Проведем плоскость через ось диполя и данную точку. Тогда местное геомагнитное время в данной точке определяется углом между этой плоскостью и главной координатной плоскостью. В магнитный полдень (12 ч 00 мин) и магнитную полночь (00 ч 00 мин) эти две плоскости совпадают. В качестве третьей координаты выбирают или параметр Мак-Илвейна L, или инвариантную геомагнитную широту Λ_L, или дипольную широту Φ. Параметр L задает удаление данной магнитной оболочки в экваториальной плоскости от центра Земли и измеряется в радиусах последней.

Оптимальный выбор третьей координаты зависит от того, какое явление изучается. Поскольку преобразование от дипольной широты к другой координате (L или Λ_L) требует детального знания геомагнитного поля, то первичные результаты наблюдений полярных сияний часто представляют с использованием дипольной широты. Но дипольное приближение не вполне справедливо. Поэтому лучше оперировать данными в координатах L или Λ_L. Зоны полярных сияний следуют вдоль линий $L=\text{const}$ с хорошим приближением.

При описании полярных сияний следует учитывать и то, что ось вращения Земли наклонена относительно плоскости орбиты на 23° и не совпадает с осью геомагнитного диполя на 11°. В результате этого направление на Солнце может в течение года отклоняться до ±34° от геомагнитной экваториальной плоскости. Вследствие этих двух эффектов суточные и сезонные вариации усиливаются.

Наиболее существенными являются сезонные вариации, которые связаны с изменением угла между осью геомагнитного диполя и направлением Земля — Солнце.

Вариация, связанная с всемирным временем UT, включает также компоненты, которые обусловлены 11-летним циклом солнечной активности и 27-дневной повторяемостью, вызванной вращением Солнца.

МАГНИТОСФЕРНАЯ СУББУРЯ

Полярные сияния определяются характеристиками вызывающих их заряженных частиц, которые, в свою очередь, зависят от процессов в магнитосфере. Поэтому, прежде чем рассматривать протекание суббури в полярных сияниях, проанализируем как протекает магнитосферная суббуря.

Движение заряженных частиц в магнитном поле направляется его силовыми линиями. Поэтому любому перемещению формы полярного сияния, наблюдаемого визуально в высоких широтах, соответствует определенное движение в магнитосфере тех частиц, которые его вызывают. Если вспомнить, как проходят магнитные силовые линии в магнитосфере, то станет ясным, что движение источника заряженных частиц в ее экваториальной плоскости по направлению от Земли в хвост магнитосферы связано с движением видимых форм полярных сияний в область более высоких широт, т. е. к полюсу. Справедливо, естественно, и обратное: движение плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы из ее хвоста в направлении к Земле будет регистрироваться наблюдателем с поверхности Земли как движение различных форм полярных сияний от полюса к экватору. Также можно рассуждать и о движениях в направлениях восток — запад. Заметим только, что когда рассматривается свечение протонных полярных сияний, то проследить связь областей свечения с источниками протонов в магнитосфере, а тем более динамику этой связи значительно сложнее: в этом процессе время от времени участвуют атомы водорода, свободные от тех ограничений, которые накладывает магнитное поле на движение протонов. Об этом мы уже говорили при рассмотрении особенностей протонных полярных сияний.

Из всего вышесказанного видно, что атмосферу высоких широт обоих полушарий можно рассматривать как

экран осциллографа или телевизора, засветку которого производят заряженные частицы, поступающие из определенных частей магнитосферы. В осциллографе, как известно, электронный пучок отклоняется электрическим полем, направленным как горизонтально, так и вертикально и расположенным в плоскости, параллельной экрану осциллографа. Эта же физическая причина, т. е. электрическое поле, гонит плазму и в магнитосфере.

Поперек хвоста магнитосферы возникает электрическое поле E, которое направлено с утренней стороны на вечернюю. Это поле возникает в результате пересоединения межпланетного магнитного и геомагнитного полей. Пересоединение происходит тогда, когда эти линии имеют противоположные направления. Поскольку магнитное поле Земли направлено с юга на север, то условием пересоединения является движение силовых линий межпланетного магнитного поля с севера на юг. Как правило, эта северо-южная компонента межпланетного магнитного поля крайне иррегулярна, поэтому и поток плазмы, возникший в хвосте магнитосферы под действием электрического поля (дрейф в ортогональных полях E и B), является по характеру своего движения турбулентным. При рассмотрении движения заряженных частиц в магнитных, электрических и других силовых полях было показано, что в данной ситуации, когда электрическое поле в хвосте магнитосферы направлено поперек хвоста с утренней стороны на вечернюю, заряженные частицы независимо от знака их электрического заряда (т. е. как электроны, так и протоны) будут дрейфовать в направлениях к Земле, поскольку все три ортогональные друг другу направления (электрического и магнитного полей и направление движения) должны составлять правовинтовую систему координат.

Теперь вернемся к рассмотрению магнитосферной бури. Она состоит из целого ряда следующих друг за другом магнитосферных суббурь. Такая неоднородность магнитосферной бури обусловлена турбулентностью плазменного облака, подходящего к Земле, и крайней иррегулярностью северо-южной компоненты межпланетного магнитного поля. Ясно, не следует ожидать, что суббури будут похожи друг на друга. Тем не менее все они имеют много общего, по которому можно составить представление о том, как протекает некая типичная магнитосферная суббуря.

Электрическое поле, возникшее в хвосте магнитосферы, вызывает внезапное начало интенсивных направленных

движений плазмы по направлению, которое ортогонально одновременно обоим направлениям E и B, т. е. по направлению $E \times B$. В хвосте магнитосферы это — движение не только к Земле, но и по направлению плоскости, разделяющей северную часть хвоста от южной. Часть магнитосферы в этой плоскости называют нейтральным слоем. Здесь имеется в виду нейтральность магнитная, поскольку выше этой плоскости геомагнитные силовые линии направлены из хвоста к Земле, а ниже, наоборот,— от Земли в хвост магнитосферы. Между ними (на середине) сходятся два противоположных направления магнитного поля. Они нейтрализуют друг друга и в результате возникает так называемый нейтральный слой.

Поскольку плазма из хвоста магнитосферы под действием электрического поля движется к Земле и одновременно сверху и снизу к нейтральному слою, то последнее движение будет сжимать плазменный слой, находящийся посередине хвоста магнитосферы и имеющий вид цилиндра с осью в направлении этого хвоста. В плазменном слое поперек хвоста магнитосферы с утренней стороны на вечернюю течет электрический ток величиной 10^7 А. Этот плазменный слой постепенно будет сжиматься, а в хвосте произойдет сложное перераспределение плазмы.

В начальной стадии развития магнитосферной суббури плазменный слой становится очень тонким. Из-за этого часть электрического тока, текущего в хвосте магнитосферы, изменит свое направление. Электрический ток из хвоста магнитосферы вдоль геомагнитных силовых линий втекает в утренний сектор овала полярных сияний, затем течет вдоль полуночного сектора овала в направлении на запад и после чего вновь вдоль геомагнитных силовых линий — обратно в хвост магнитосферы. Следы этого тока, вернее, того его количества, которое содержится в ионосфере в овале полярных сияний (так называемая полярная струя), мы уже встречали. Ее наличие всегда будет фиксироваться магнитометрами в высоких широтах как отрицательная бухта в горизонтальной составляющей геомагнитного поля.

Теперь понятно, почему интенсивность этой полярной или авроральной электроструи, характеризуемой индексом AE (первые буквы ее английского названия), является мерилом, показателем состояния магнитосферы. Двигаясь в электрическом и магнитном полях, частицы плазмы ускоряются и возникает плазма с температурой 10^7 К и более.

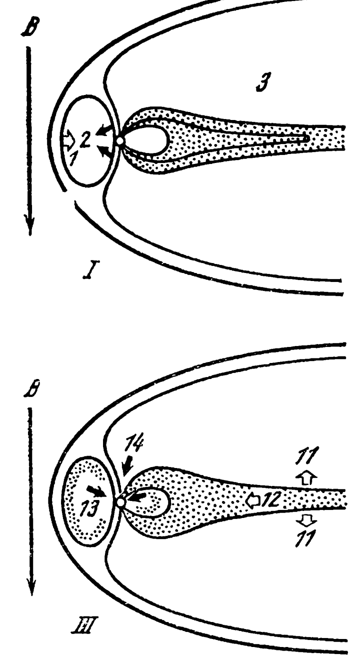
Часть этой плазмы вторгается в верхнюю атмосферу высоких широт и вызывает там различные формы полярных сияний, а также различные процессы в полярной ионосфере (спорадические слои ионизации, поглощение радиоволн, ионосферные неоднородности). Другая часть — пополняет собой плазменный слой в хвосте магнитосферы.

Часть горячей плазмы, которая попадает на оболочки с замкнутыми геомагнитными силовыми линиями, т. е. в области захвата, образует так называемый кольцевой электрический ток, располагающийся на удалении 2—3 радиусов Земли и идущий с востока на запад. Магнитное поле этого тока, создаваемого протонным поясом, на поверхности Земли направлено с севера на юг. Поэтому на земных магнитометрах наличие кольцевого тока проявится уменьшением горизонтальной составляющей геомагнитного поля. Это главная фаза магнитосферной бури, которая создается серией магнитосферных суббурь, во время каждой из которых идет подпитка протонного пояса (кольцевого тока).

Сопоставим развитие магнитосферной суббури, т. е. процессов в магнитосфере, с развитием суббури в полярных сияниях. Для этого обратимся к схеме (рис. 31), на которой изображены направление межпланетного магнитного поля (север—юг), плазменный слой в хвосте магнитосферы и области захваченной радиации. Широкими стрелками показаны направления движения плазмы.

В самом начале при пересоединении силовых линий межпланетного магнитного поля и геомагнитного поля происходит поджатие магнитосферы Земли с дневной стороны, или, другими словами, движение магнитопаузы к Земле (см. рис. 31, *1*). Как видим, на дневной стороне в высоких широтах, где геомагнитные силовые линии входят в верхнюю атмосферу, полярные сияния должны двигаться в направлении к экватору (жирные стрелки — *2*). При сжатии магнитосферы магнитное поле в хвосте будет усиливаться.

После этого за период времени менее 1 ч плазма совершает в хвосте магнитосферы описанное выше движение — в направлении к Земле и поперек к нейтральному слою. Когда плазменный слой начинает двигаться по направлению к Земле, в овале полярных сияний на экваториальной его кромке интенсивность полярного сияния резко увеличивается (или уярчается имеющаяся спокойная дуга полярного сияния, или возникают новые дуги). Затем сияние



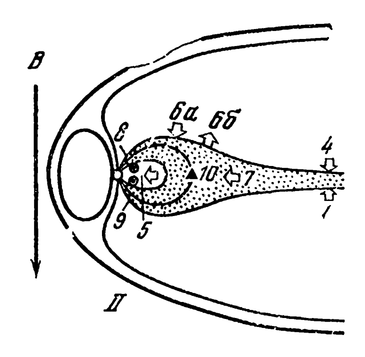


Рис. 31. Схематические диаграммы, иллюстрирующие различные магнитосферные явления на разных фазах суббури

I — начало процесса пересоединения, когда межпланетное магнитное поле поворачивается от северного направления к южному и магнитный поток с дневной стороны переносится в хвост магнитосферы: *1* — движение к Земле, *2* — движение сияний, *3* — увеличение *B*;

II — начальная стадия формы развития: *4* — утоньшение плазменного слоя, *5* — движение плазменного слоя к Земле, *6а*, *6б* — направления движения силовой линии, *7* — конвекция, *8* — движение сияний к полюсу, *9* — полярная электроструя, *10* — силовые линии магнитного поля, подобные диполю;

III — начальная стадия фазы восстановления: *11* — расширение плазменного слоя, *12* — движение плазмы к Земле, *13* — инжекция плазмы в высокоширотную ионосферу, градиентный и электромагнитный дрейфы, *14* — полярная инжекция

начинает двигаться к полюсу. Этот момент соответствует началу суббури в полярных сияниях. После уменьшения II плазменный слой наблюдается снова, вначале в ближней к Земле части хвоста (6б), а затем на больших геометрических расстояниях (11). Плазменный слой появляется значительно скорее в плоскости нейтрального слоя, чем в направлении, нормальном к этому слою. Быстрое движение форм полярных сияний в направлении к полюсу в полуночном секторе (8) происходит при утоньшении плазменного слоя на расстояниях от Земли более 18 R_E. Движение сияний к полюсу связано с появлением интенсивного западного электрического тока — полярной электро-

струи — (9) и ее движением к полюсу. Магнитное поле Земли на расстояниях 6—10 $R_в$ меняет свою форму от «вытянутого» или «открытого» хвоста до дипольной конфигурации (10). Очевидно, ток, который является источником вытянутого в виде хвоста магнитного поля, внезапно уменьшается или частично прерывается. Этот момент совпадает с появлением западной электроструи.

Важный процесс периода суббури — струйная инжекция плазмы из хвоста магнитосферы в область захвата (13). Видимо, инжекция в область захвата происходит не вдоль всей внутренней границы плазменного слоя, а из довольно узкой области в полуночном секторе (13). Эти захваченные магнитным полем электроны являются основным источником их во внешнем радиационном поясе, а также источником электронов, которые вызывают интенсивные поглощения радиоволн в утреннем секторе на широтах зоны полярных сияний. Выше говорилось, что захваченные таким же образом протоны служат основным источником кольцевого тока и протонных полярных сияний. Рассмотрим более подробно протекание суббури в полярных сияниях.

СУББУРЯ В ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЯХ

Положение овала полярных сияний зависит как от местного, так и от мирового времени. Четко разделить действия этих двух факторов достаточно трудно.

Каким видит полярные сияния наблюдатель, находясь в определенной точке их зоны? Напомним, что в ночные часы овал полярных сияний будет располагаться над наблюдателем (зона и овал совпадают), а в остальное время суток (в северном полушарии) — севернее его.

В вечернее время наблюдатель вначале зафиксирует свечение в северной части неба — в районе овала полярных сияний. Он увидит на первых порах только верхушки дуг полярных сияний и воспримет их просто как свечение. По мере наступления темноты ночная часть овала полярных сияний будет надвигаться на наблюдателя, т. е. свечение сместится по направлению к экватору, а значит, и к станции, где находится наблюдатель. В это время последний четко просматривает нижний край сияния. До 21 ч местного времени он может видеть спокойные и однородные формы сияния и только в короткие промежутки времени — лучи полярных сияний и складки.

В последующие два часа (до 23 ч по местному времени) один или два раза наблюдаются складки, которые быстро передвигаются к западу вдоль дуги полярного сияния. После таких периодов (продолжительностью не более получаса) сияния снова имеют спокойные формы.

Около полуночи сияния должны находиться над головой наблюдателя, т. е. в зените. При этом примерно за несколько часов (от 23 до 2 ч ночи) он может увидеть не только спокойные формы полярных сияний, но и возмущенные, или, как принято говорить, активные формы. Став в это время внезапно активными, полярные сияния проявляются на большей части неба. Но постепенно они стихают, остаются лишь светящиеся пятна в виде облаков, которые распространяются по всему небу. Свечение пятен имеет не постоянный, а пульсирующий характер. Затем снова возникает спокойная однородная дуга полярного сияния или другие его спокойные формы. Такое изменение картины полярных сияний от спокойной формы к активной и затем к пятнам и, наконец, опять к спокойной форме (т. е. своего рода цикл развития полярного сияния) может повториться. В отдельные ночи можно наблюдать последовательное развитие от одного до четырех таких циклов.

Таким образом, получается, что наблюдатель, находящийся в зоне полярных сияний, чаще всего (т. е. статистически наиболее вероятно) будет видеть спокойные дуги сияний вечером, активные лучистые полосы около полуночи и светящиеся пятна в утренние часы. Может даже создаться впечатление о некотором фиксированном распределении активности полярных сияний, под которым Земля прокручивается в течение суток.

На самом деле эта картина верна только статистически и в каждом отдельном случае распределение различных форм полярных сияний более сложное. С. А. Акасофу показал, что в определенные периоды все сияния вдоль овала полярных сияний (но не вдоль их зоны) имеют спокойные формы. Но время от времени это спокойствие внезапно в период геомагнитных бурь нарушается. Нарушение начинается в полуночном секторе овала полярных сияний — на его экваториальной границе, т. е. на южной кромке овала (в северном полушарии). Затем область активных форм распространяется по всем направлениям: к полюсу, к западу и к востоку вдоль овала, а также к экватору. Постепенно во всем овале полярных сияний все стихает, успокаивается. Один такой активный период, который мо-

жет длиться от 0,5 до 1,5—2 ч, принято называть суббурей в полярных сияниях. Серия таких суббурь, следующих друг за другом, образует бурю.

Почему же длительное время считалось, что каждому временному сектору характерны свои формы полярных сияний? Дело в том, что быстро движущиеся активные формы сияний в вечернем секторе не всегда привлекали внимание. Они характеризуются весьма специфической особенностью — изгибом, который во время суббури движется к западу вдоль спокойной дуги полярных сияний (в вечернем секторе). Этот период непродолжителен: изгиб движется со скоростью около 1 км/с, т. е. проносится над отдельной станцией наблюдений почти мгновенно. Ясно, что при статистической обработке данных наиболее часто наблюдаемой характеристикой полярного сияния в вечернем секторе овала полярных сияний оказывалась спокойная однородная дуга, а не изгиб. Кроме того, в вечернее время овал проходит севернее станций, попадающих ночью в его зону. Поэтому регистрировать детали форм полярных сияний, которые на этот раз видны не в зените, а на северной части горизонта, сложнее.

Эпицентр суббури расположен в полуночном участке аврорального овала. Затем она распространяется во все стороны, в том числе и на восток — в сторону утреннего сектора, где чаще всего наблюдаются светящиеся пятна, т. е. те формы, в которые по мере затухания превращаются лучистые полосы полярных сияний. Если активные периоды (суббури) проходят достаточно часто (с интервалом меньше нескольких часов), то светящиеся пятна в утреннем секторе не успевают полностью исчезать с небосвода. Отсюда считалось, что для утреннего сектора характерна фиксированная картина полярных сияний.

Как же протекает суббуря в полярных сияниях? Во-первых, само ее начало определяется не местным временем, а мировым: в определенный его момент начинается процесс активизации форм полярных сияний, который постепенно захватывает овал полярных сияний. Но какую именно форму имеют эти активные сияния, зависит от местного времени: вечером это движущийся к западу изгиб, утром — светящиеся пятна.

Для удобства анализа данных весь период суббури был поделен на отдельные подпериоды или фазы. Каждый из этих подпериодов характеризуется определенным характером сияний, их динамики и форм. Началом суббури в по-

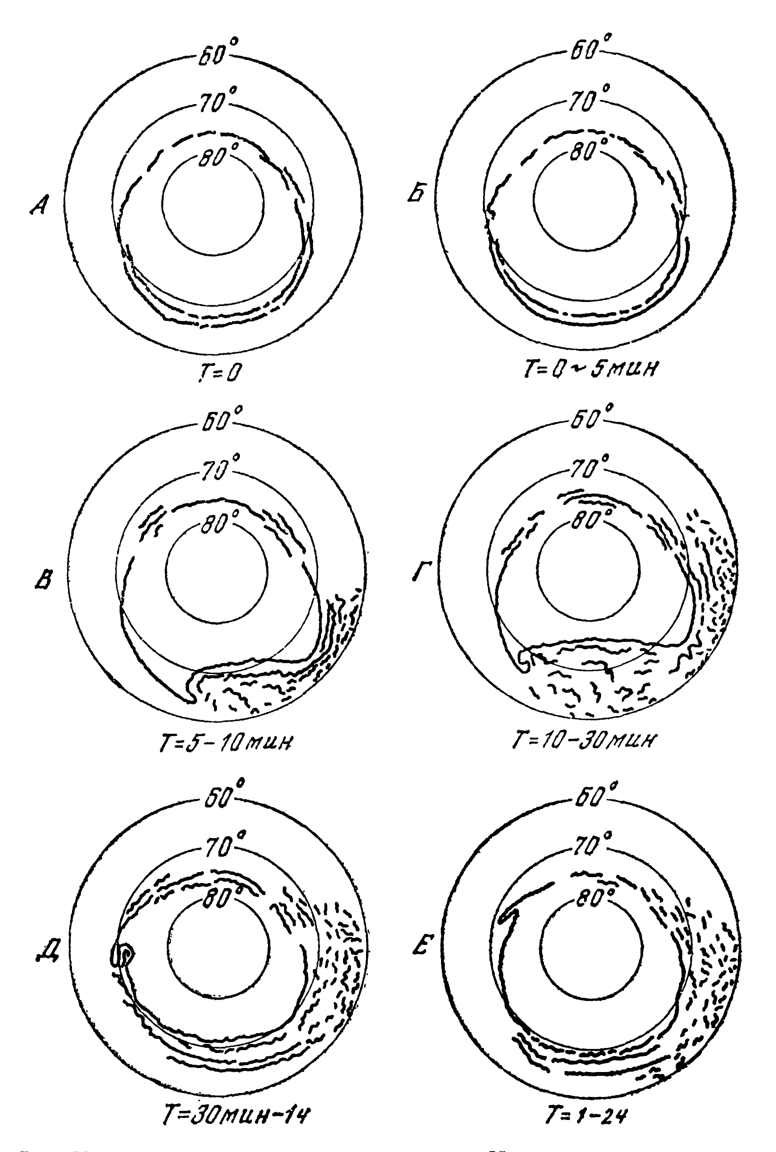


Рис. 32. Схема, иллюстрирующая развитие суббури в полярных сияниях

лярных сияниях принято считать внезапное уярчение одной из спокойных дуг, расположенных в полуночном секторе овала полярных сияний. Кроме того, началом может служить образование новой дуги (рис. 32, схема *Б*). Это происходит за 5 мин от начала процесса. Затем уярченная или новая дуга начинает быстро двигаться к полюсу. В околополуночном секторе в полярных сияниях появляется «выпуклость» (рис. 32, схема *В*). Продолжительность этого подпериода 5—10 мин. После чего в образовавшейся выпуклости начинается распад полярных сияний. При этом выпуклость постепенно расширяется во всех направлениях (схема *Г*). Этот подпериод длится 10—30 мин. В вечернем секторе возникает крупномасштабная складка или, как уже говорилось, движущийся к западу вдоль дуги сияний изгиб (схема *Д*). Светящиеся пятна в утреннем секторе, образовавшиеся в результате распада активных форм сияний, дрейфуют к востоку со скоростью 30 м/с. На дневной стороне наблюдаются только лучистые формы полярных сияний. Начало суббури в полярных сияниях на дневной стороне проявляется только в предполуденные и послеполуденные периоды. В это время появляются тонкие лучистые дуги, которые ориентируются вдоль овала полярных сияний, их интенсивность увеличивается. Процесс активизации полярных сияний в этих формах на дневной стороне не наблюдается.

Через 5—10 мин после начала суббури на полуденной стороне все еще видны отдельные лучи; дуги полярных сияний в предполуденные и послеполуденные часы уярчаются. Почти одновременно на ночной и дневной сторонах усиливается интенсивность сияний. Но когда на ночной стороне сияния достигают наибольшей активности, на дневной — они ослабевают и распадаются.

Так выглядит фаза развития суббури от ее начала в полуночном секторе овала полярных сияний до момента, когда расширяющаяся выпуклость достигает наибольшей геомагнитной широты. Продолжительность этой фазы постоянно меняется, но в среднем составляет от 30 мин до 1 ч.

Вслед за ней идет фаза восстановления спокойных форм полярных сияний. Ее начало связано с увеличением активности полярных сияний на дневной стороне, где они появляются в зените в большом интервале широт. На приполюсной границе овала дневной стороны возникают формы сияний, характерные для этой стороны при спокойном

геомагнитном поле. В этот подпериод изгиб продолжает движение на запад, уходя на большие расстояния (схема *Д*) и постепенно вырождаясь в нерегулярные полосы свечения. Утром в восстановительную фазу движущиеся к востоку светящиеся пятна наблюдаются до конца суббури, т. е. до момента, когда распределение форм полярных сияний во всех участках овала будет таким же, как и до начала суббури.

Фотоснимки всей полярной области, сделанные камерой, установленной на ИСЗ, подтвердили правильность описанной выше картины суббури в полярных сияниях. Ценную информацию дали также исследования с помощью аппаратуры, смонтированной на высотных скоростных самолетах-лабораториях. Последние, двигаясь в сторону вращения Земли, позволяют наблюдателю (и измерительной аппаратуре) находиться постоянно в точке с одним и тем же местным временем. Благодаря этому наблюдатель имеет возможность видеть изменения форм полярных сияний, зависящие только от мирового времени.

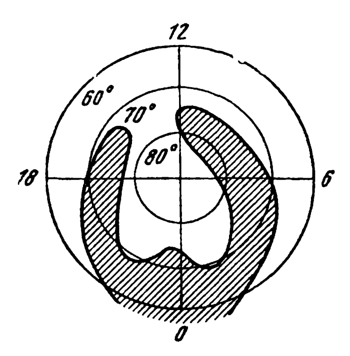


Рис. 33. Распределение протонного полярного сияния в координатах широта — время эксцентричного диполя

Теперь рассмотрим, как протекает суббуря в протонных полярных сияниях. Установлено, что они заметно изменяются во время суббури в полярных сияниях. Изучение этих изменений дает информацию о поведении протонов с энергиями 1—50 кэВ в моменты полярных сияний. Эти протоны играют важную роль в основных процессах, связанных с магнитосферной суббурей.

Обратимся к рис. 33. Как видим, протонное сияние занимает область овальной формы с эксцентриситетом относительно геомагнитного полюса. Область-овал протонного сияния располагается к экватору от овала электронных полярных сияний в вечерние часы. В утреннем секторе это положение выражено менее четко. Во время суббури картина существенно усложняется. Поэтому трудно точно определить положение протонного полярного сияния относительно электронного.

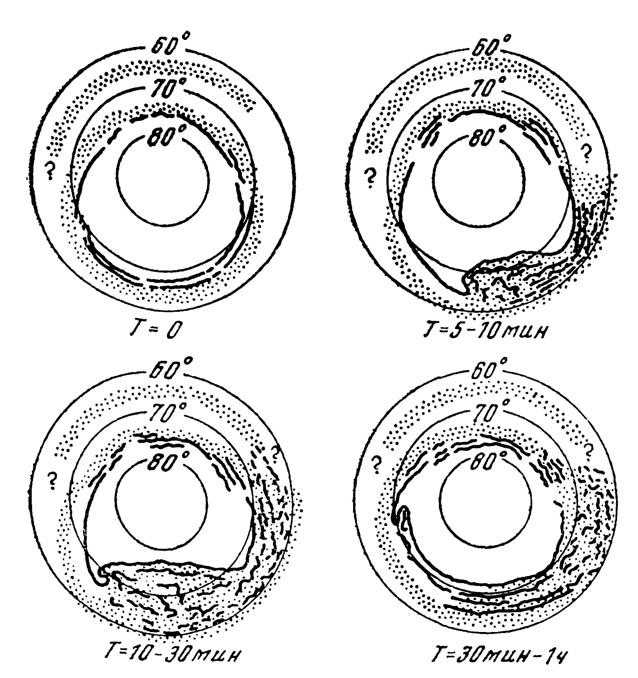


Рис. 34. Развитие суббури в протонном полярном сиянии

Как показали измерения, в полуночном секторе в период суббури водородные эмиссии медленно ослабевали в момент появления над станцией наблюдений выпуклости электронных полярных сияний.

В ранние вечерние часы зона водородных эмиссий располагалась значительно южнее яркого свечения полярных сияний и визуально была связана с более слабой однородной дугой, совпадающей с максимумом водородной эмиссии. Последняя медленно ослабевала при наличии очень яркого электронного полярного сияния, охватившего весь небосвод. В момент наблюдения электронных полярных сияний, а также после их распада интенсивность излучения линии H_β увеличивается по всему небу, но она же остается довольно постоянной в областях, где имеют место пульсирующие полярные сияния.

О том, как развивается суббуря в протонном полярном сиянии, можно судить по рис. 34. Здесь условно обозначены области вторжения протонов для четырех стадий

развития суббури. В отсутствии суббури протоны высыпаются вдоль овальной полосы, расположенной несколько экваториальнее овала электронных полярных сияний. В полуночном секторе протоны вторгаются по всей области выпуклости полярного сияния. По мере развития суббури район вторжения, как и сама выпуклость, быстро расширяется. В вечернем секторе протонное сияние в начальной фазе суббури с большой скоростью смещается к экватору. Изгиб электронного полярного сияния, движущийся к западу и отклоняющийся далеко в вечерний сектор, видимо, не содержит водородных эмиссий.

В утреннем секторе водородные эмиссии наблюдаются на значительных площадях. Их интенсивность сохраняется почти неизменной, в то время как интенсивность свечения окружающих пятен может иметь пульсирующий характер.

Говоря об источниках протонных полярных сияний, следует отметить, что в полуночном и раннем утреннем секторах кольцевого тока в начальную фазу развития полярной суббури протоны внезапно исчезают. Возможно, они и вызывают протонные полярные сияния во время суббури.

Рассмотрим, как связана суббуря в полярном сиянии с изменениями, происходящими в это время в геомагнитном поле. Речь идет о ее связи с полярной магнитной суббурей. Обратимся к понятию токовые системы. Как известно, токовые системы, рассчитанные по данным об изменении векторов геомагнитного поля, называются эквивалентными токовыми системами. Конечно, они не являются реальными. Эти токовые системы эквивалентны реальным в смысле создаваемого ими магнитного поля.

Было показано, что основные явления, связанные с электрическими ионосферными токами (так же как и полярные сияния), протекают вдоль овала, а не зоны полярных сияний.

В зависимости от того, куда движется электрический ток, на запад или на восток, его магнитное поле будет иметь составляющую в горизонтальной плоскости, направленную соответственно на юг или на север. Если электрический ток в ионосфере направлен на восток, то составляющая магнитного поля в горизонтальной плоскости (H-составляющая) должна увеличиваться, если на запад, то — уменьшаться. Это регистрируют магнитометры на поверхности Земли. Магнитометр на НСЗ, ведущий измерение выше области электрического ионосферного тока, дает

обратную картину: над восточным током будет отмечено уменьшение суммарного магнитного поля (геомагнитное поле плюс магнитное поле тока), над западным — его увеличение. Эти изменения магнитного поля в сторону его увеличения или уменьшения, имеющие на записях магнитометров форму бухты, называются положительными и отрицательными магнитными бухтами.

Наличие отрицательной магнитной бухты в горизонтальной составляющей магнитного поля на поверхности Земли свидетельствует о том, что создающий ее ток, или, как принято говорить, электроструя (электроджет), направлен в ионосфере на восток.

Полярная магнитная суббуря выглядит следующим образом. На время магнитосферной суббури (1—3 ч) в ионосфере высоких широт образуется токовая система (рис. 35). Как видим, электрические токи текут в утреннем секторе овала полярных сияний на запад, а в вечернем секторе на восток. Эта токовая система появляется только время от времени (в период магнитосферных суббурь) и проявляется импульсным образом в виде последовательных всплесков. Так же как овал полярных сияний привязан не к Земле, а к направлению Земля—Солнце, эта токовая система фиксирована относительно этого направления, а Земля вместе с наблюдательными станциями прокручивается под этой токовой системой.

Теперь обратимся к тому, как связаны полярные сияния в различных временных секторах во время суббури в полярных сияниях с магнитными возмущениями, обусловленными этой токовой системой. Магнитные возмущения будем рассматривать в непосредственной близости от областей, занятых полярным сиянием. Эту связь можно проследить на диаграмме типичных вариаций горизонтальной составляющей геомагнитного поля во время суббури полярных сияний.

Исследования показали, что одновременно со смещением фронта выпуклости в полярных сияниях в полуночном секторе движется электрический ток западного направления. Это подтверждают магнитные записи, показывающие динамику отрицательных бухт в горизонтальной составляющей магнитного поля.

В вечернем секторе овала полярных сияний суббури характеризуются движением к западу изгиба вдоль дуги сияния. Сопоставление с данными об изменении магнитного поля показало, что прохождение изгиба связано с уве-

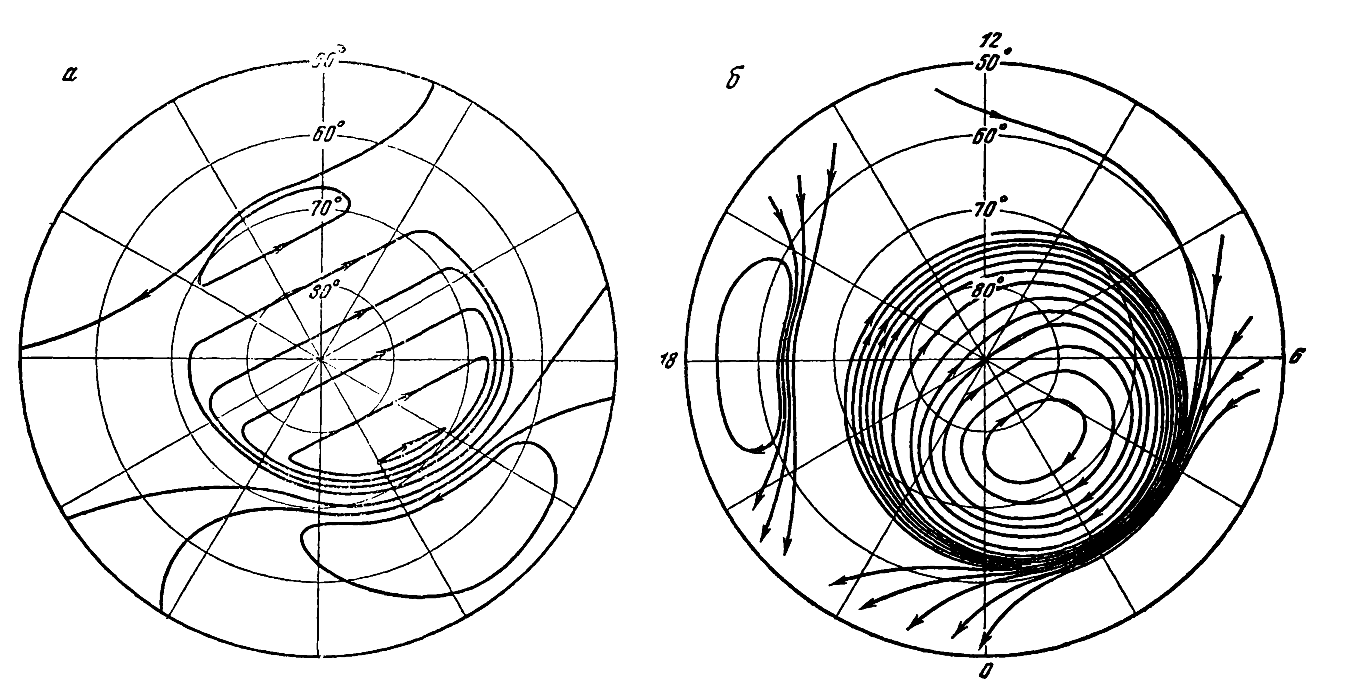


Рис. 35. Эквивалентные токовые системы умеренной (*а*) и интенсивной полярной магнитной суббури (*б*) по Я. И. Фельдштейну

личением магнитного поля, т. е. магнитометры на Земле регистрируют положительную магнитную бухту в том случае, когда движущийся к западу изгиб перемещался севернее станции измерения. Часто наблюдаются более сложные ситуации, в которых движение изгиба на запад сопровождается как положительными, так и отрицательными бухтами в зависимости от времени развития явления и места регистрации. Станция полярной шапки, находящаяся далеко от изгиба, регистрирует положительную бухту в горизонтальной составляющей магнитного поля. Станция, расположенная достаточно близко к западной электроструе, отметит отрицательную бухту. Для того чтобы правильно сопоставлять указанные данные, необходимо знать расстояние между станцией и овалом полярных сияний.

В утреннем секторе во время суббури активность полярных сияний зависит от положения станции относительно овала сияний. Если наблюдения ведутся из пункта, расположенного к полюсу от овала полярных сияний, то будут регистрироваться либо расширение сияния к полюсу, либо движущийся к востоку изгиб. Этот изгиб менее выражен, чем в вечернем секторе. Вначале наблюдается незначительное движение дуг полярных сияний к экватору, которое сменяется более существенным движением их к полюсу. В самом овале часто регистрируется дрейф нерегулярных полос в направлении к востоку. На экваториальном краю овала наиболее часто происходит распад дуг и дрейф образующихся светящихся пятен к востоку.

Распад активных форм полярных сияний начинается сначала на экваториальной границе овала полярных сияний в полуночном секторе и быстро распространяется в направлении к востоку и к полюсу. Распад дуг полярных сияний связан с отрицательной бухтой. В утренние часы величина самой бухты меньше, чем в полуночные часы, а начало ее выражено менее четко.

В утреннем секторе вдоль зоны полярных сияний (а не вдоль овала) наблюдается обширное свечение в линиях 3914 и 5577 Å. Напомним, что эта область совпадает с месторасположением области повышенного риометрического поглощения радиоволн в утренние часы. Эти сияния названы сияниями типа мантии. Интенсивность этих сияний зависит от степени планетарной возмущенности геомагнитного поля Земли (от индекса K_p).

ИОНОСФЕРНАЯ СУББУРЯ

Магнитосферная суббуря проявляется в верхней атмосфере высоких широт не только в виде полярных сияний и вариаций геомагнитного поля. Под действием высыпающихся электронов и протонов происходит изменение концентрации свободных электронов в различных областях ионосферы, нарушается ее регулярность и пространственная однородность. Повышенная ионизация в нижней ионосфере вызывает поглощение радиоволн.

Рассмотрим, что собой представляет ионосферная суббуря, как она протекает и как она связана с суббурей в полярных сияниях. Но вначале приведем самые общие сведения об ионосфере высоких широт.

Земная атмосфера характеризуется давлением, температурой, плотностью и химическим составом. Плотность атмосферы и ее давление с высотой уменьшается экспоненциально. Температура до 12—13 км над уровнем моря уменьшается до 200 К. Эта область нижней атмосферы называется тропосферой. Высота тропопаузы меняется от экватора к полюсу, как это показано на рис. 36. Выше тропосферы располагается стратосфера (до 50 км), в которой температура с высотой увеличивается до того значения, которое наблюдается на поверхности Земли. Выше этого уровня температура снова уменьшается с высотой. Эта область называется мезосферой, которая на 85 км заканчивается мезопаузой с температурой 150 К. На этой высоте температура земной атмосферы самая низкая. Выше мезопаузы температура с высотой снова увеличивается в интервале высот 30—40 км — от 150 К до 500 К. Выше этого уровня днем и ночью температура изменяется с высотой по-разному: днем она достигает 1500—2000 К, а ночью 700—1000 К. Выше 200—250 км как днем, так и ночью температура с высотой не меняется.

Состав атмосферы зависит от тех движений, которые в ней происходят. От поверхности Земли до уровня 105—110 км атмосфера хорошо перемешана благодаря достаточной вязкости атмосферного газа, который в этой области движется как единое целое. Поэтому состав с высотой на этих уровнях не меняется. Его поддерживает постоянным турбулентное перемешивание или турбулентная диффузия. На этих уровнях изменяются только относительные концентрации химически активных малых компо-

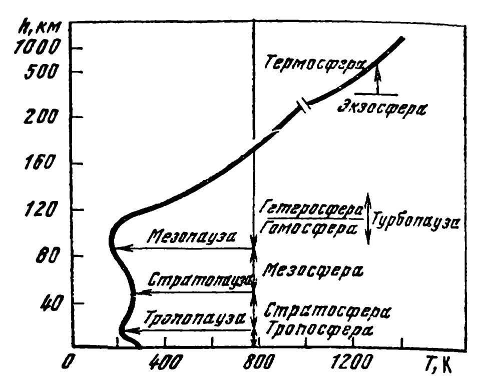


Рис. 36. Высотный профиль температуры земной атмосферы

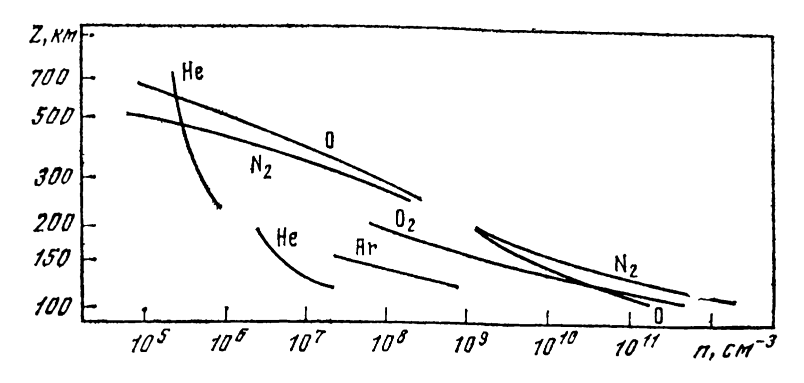


Рис. 37. Высотное распределение концентрации атмосферных газов N_2, O_2, Ar, O, He

нент, таких, как окись азота, озон и т. д. Область постоянного химического состава называется гомосферой.

Выше 105—110 км турбулентная диффузия уменьшается и различные атмосферные газы начинают вести себя каждый по-своему: более легкие частицы устремляются вверх, более тяжелые движутся медленнее. Чем выше, тем больше легких частиц (водород, гелий) и меньше тяжелых (кислород, азот).

Вся гетеросфера (до 105—110 км) имеет тот же состав, что и воздух у поверхности Земли: 78% молекулярного азота, 21% молекулярного кислорода и около 1% аргона. Остальные частицы (O_3, NO, N, H_2O) составляют менее 0,1% общего количества частиц.

Выше 100 км встречается атомарный кислород, который образуется из молекулярного путем диссоциации молекул O_2 излучением Солнца. Атомы кислорода появляются

на высоте 80—90 км; на высоте 120—130 км количество атомарного и молекулярного кислорода уравнивается, а на 160—180 км концентрация O равна концентрации N_2. Выше 600 км обнаружены большие количества гелия и водорода, причем первый является основной компонентой атмосферы до высоты 1500 км, а затем его постепенно сменяет второй (рис. 37).

Распределение с высотой плотности атмосферы, а также температуры в термосфере (выше мезопаузы) зависит от солнечной активности и времени суток (рис. 38).

Теперь рассмотрим, как образуется ионосфера Земли.

На земную атмосферу падает излучение Солнца с длинами волн от долей Ангстрема до излучения в далеком ультрафиолете (рис. 39). Излучение в различных диапазонах длин волн проникает в атмосферу Земли на различные высоты. Это зависит от соотношения между энергией излучения (которая обратно пропорциональна длине волны) и порогами диссоциации, ионизации и других элементарных процессов.

На рис. 40 стрелками показаны длины волн излучений Солнца, наиболее важных для ионосферы (He II, He I, $H_{\alpha,\beta,\gamma}$, L). Указаны также основные атмосферные газы, которые поглощают излучение данной длины волны (N_2, O_2, OH), и основные образующие при этом ионы (O_2^+, N_2^+, NO^+).

Под действием солнечного излучения происходит ионизация атмосферных газов — образуются свободные электроны, оторванные от атомов, и положительные ионы. Если задать интенсивность солнечного излучения и сечения взаимодействия этого излучения с атмосферными газами, то можно рассчитать скорость ионизации при разных условиях. Излучение Солнца, естественно, зависит от его зенитного угла.

На рис. 40 показаны высотные профили скорости ионообразования (количество свободных электронов, образованных за 1 с в 1 см^3) для различных величин зенитного угла Солнца. Высота Z выражается через истинную высоту h и высоту однородной атмосферы H

$$Z = \frac{h - h_0}{H},$$

где $h = h_0$ при $x = 0$. Здесь $H = eB/mc$, где e и m — заряд и масса электрона, c — скорость света.

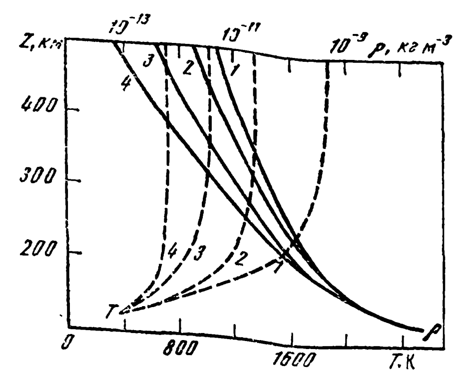


Рис. 38. Высотное распределение плотности и температуры в различные периоды времени

1, 2 — максимальная солнечная активность, полдень и полночь соответственно; *3, 4* — минимальная солнечная активность, полдень и полночь соответственно

Рис. 39. Глубина, на которую проникает солнечное излучение с длинами волн от 0,1 до 1000 Å

Рис. 40. Распределение скорости ионизации в функции высоты для различных зенитных углов Солнца

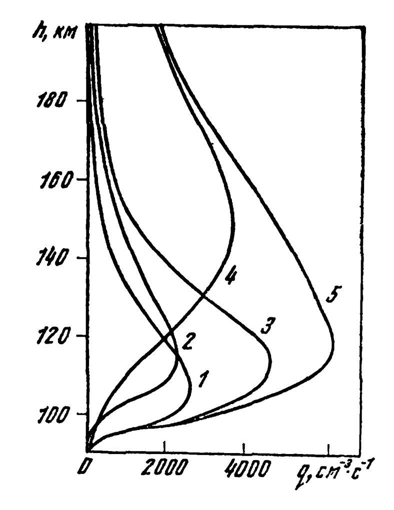


Рис. 41. Профили скорости ионообразования в областях *E* и *F* при вертикальном падении солнечного излучения при низкой солнечной активности

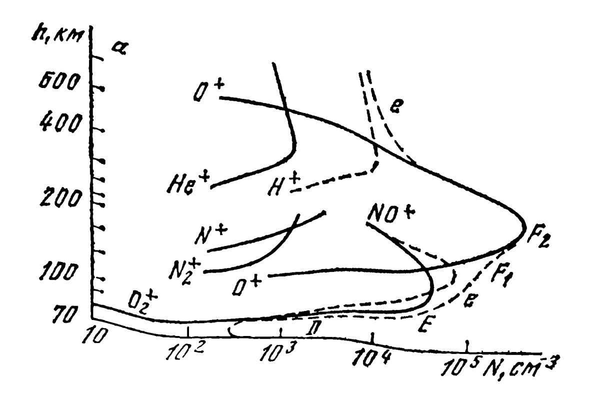
1 — за счет излучения в диапазоне длин волн от 8 до 140 Å;
2 — от 796 до 1027 Å;
3 — сумма скоростей 1 и 2;
4 — за счет излучения от 140 до 796 Å;
5 — сумма скоростей 1, 2, 4

Скорость образования электронов в зависимости от высоты дана на рис. 41. Здесь, в частности, показано, что суммарная скорость ионообразования (*5*) ответственна за образование ионосферы. Высотные профили концентрации различных ионов (N_2^+, O_2^+, NO^+, O^+, N^+, H_e^+, H^+) и электронов *e* показаны на рис. 42.

Электронная концентрация в разных областях ионосферы (*D*, *E* и *F*) зависит от состояния атмосферы, от излучения Солнца и других факторов. Поэтому электронные высотные профили будут изменяться в зависимости от солнечной и магнитной активности, сезона и времени суток, широты.

В высоких широтах, где имеют место полярные сияния, на верхнюю атмосферу, кроме электромагнитного волнового излучения, действуют потоки заряженных частиц (электронов и протонов). Они усиливаются во время солнечных и магнитосферных бурь и вызывают ионизацию атомов и молекул, повышая таким образом концентрацию электронов на разных уровнях ионосферы в 10—100 раз. Так, в нижней ионосфере (около 92 км) электронная концентрация в течение 15 с может увеличиваться в 100 раз в периоды высыпания потоков электронов перед началом суббури в полярных сияниях.

В верхнюю атмосферу приходят электроны и протоны с широким диапазоном энергий. Наибольшую энергию имеют галактические космические лучи (с энергией 10^9 эВ).



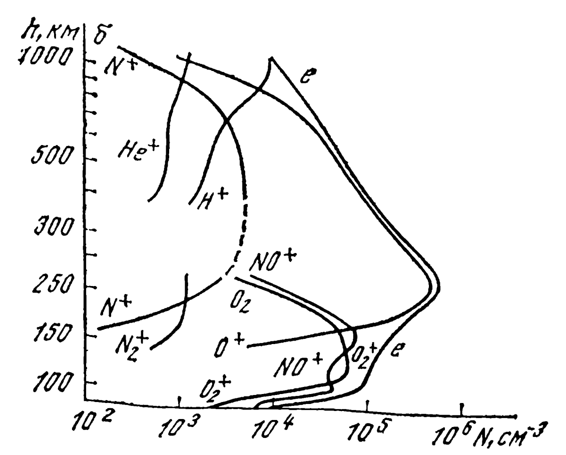


Рис. 42. Распределение с высотой основных ионных компонент, которые образуются в результате фотодиссоциации, фотоионизации и последующих химических процессов

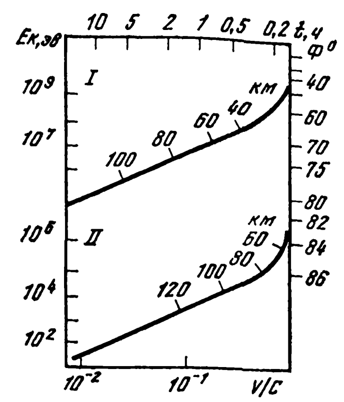
а — вычисленное; *б* — измеренное

Затем идут солнечные космические лучи (появляющиеся в периоды протонных вспышек и порождающие ППШ). За ними следуют протоны, которые связаны с солнечными и магнитосферными бурями и имеют энергию в несколько кэВ.

Заряженные частицы отклоняются магнитным полем Земли. Они могут проникать в нижнюю атмосферу лишь через ограниченные области вокруг полюсов.

Рис. 43 Минимальные широты и высоты, на которые могут проникать в земную атмосферу протоны (*I*) и электроны (*II*) в зависимости от их энергий и скоростей

Высота проникновения указана на соответствующих кривых. Скорость частиц дана в единицах скорости света



На рис. 43 по правой вертикальной оси указана минимальная широта, которой могут достичь протоны и электроны, двигаясь со скоростями, значения которых отложены по нижней горизонтальной оси. На верхней горизонтальной оси указано время, необходимое для прямолинейного движения частиц от Солнца к Земле. Слева по вертикали нанесены энергии частиц.

Ионизация заряженными частицами происходит особенно эффективно в конце пути заряженной частицы, т. е. когда время пролета частицы около атома становится сравнимым с временем пребывания электрона на борновской орбите. Когда частицы попадают в атмосферу, где газ распределен по барометрическому закону, скорость образования электронов в конце пути увеличивается очень быстро. Протоны, образующиеся при протонных вспышках на Солнце и покрывающие расстояние от Солнца до Земли за 1—3 ч, создают наибольшее количество электронов в интервале высот до 60 км, т. е. в области *D* ионосферы (рис. 44).

Нам необходимо остановиться на условиях протекания электрических токов в ионосфере. Ранее было сказано, что электрические токи текут в основном около уровня 100 км. Это связано с высотным распределением электропроводности. Максимум электропроводности приходится на высоту около 105 км (рис. 45).

Изменения в полярной ионосфере во время магнитосферной суббури очень тесно связаны с суббурей в полярных сияниях и полярной магнитной суббурей. Это и понятно, поскольку первопричина этих явлений одна и та

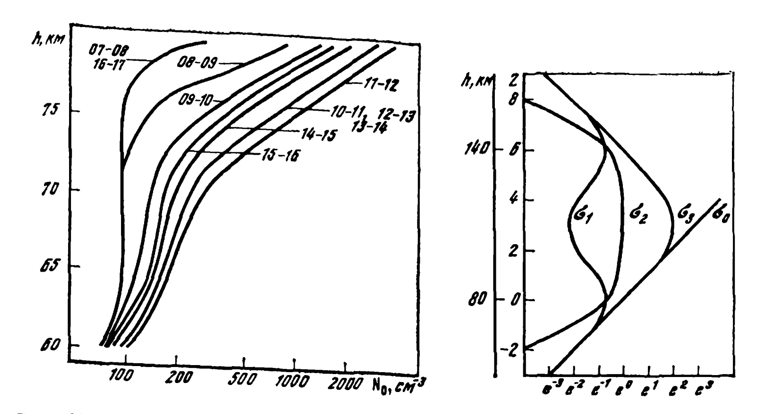


Рис. 44. Распределение электронной концентрации в области *D* ионосферы, измеренной вблизи Осло (Норвегия) методом кросс-модуляции

Числами на графиках указано время дня в часах (время среднеевропейское 15° в. д.)

Рис. 45. Высотное распределение электропроводности ионосферы

На вертикальной оси указаны два значения высоты над уровнем моря

же — вторгающиеся в верхнюю атмосферу высоких широт заряженные частицы и электрические поля.

Как уже говорилось, в высоких широтах в отличие от средних в ионизации атмосферы, кроме электромагнитного излучения Солнца, участвуют также заряженные частицы. Если анализировать профиль электронной концентрации снизу вверх, то получится следующая картина. На самом низу ионосферы, выше 50 км, ионизация создается потоками солнечных космических лучей (протонов с энергиями в сотни МэВ). Эта ионизация вызывает поглощение радиоволн коротковолнового диапазона. Область повышенной ионизации в нижней ионосфере занимает всю полярную шапку. Это так называемое поглощение полярной шапки (ППШ), с которым связано появление форм полярных сияний определенных свойств. Особенность состоит в том, что частицы, вызывающие ППШ (протоны и α-частицы), имеют энергию от 10 до 100 МэВ и проникают на высоты 30—80 км, где производят ионизацию и возбуждение. Здесь происходит быстрая дезактивация возбужденных атомов при столкновениях с окружающим газом. Поэтому ниже 70 км почти все излучение в линии 5577 Å гасится. Отсюда наиболее поразительной оптической характеристикой этого типа свечения является то, что полосы первой отрицатель-

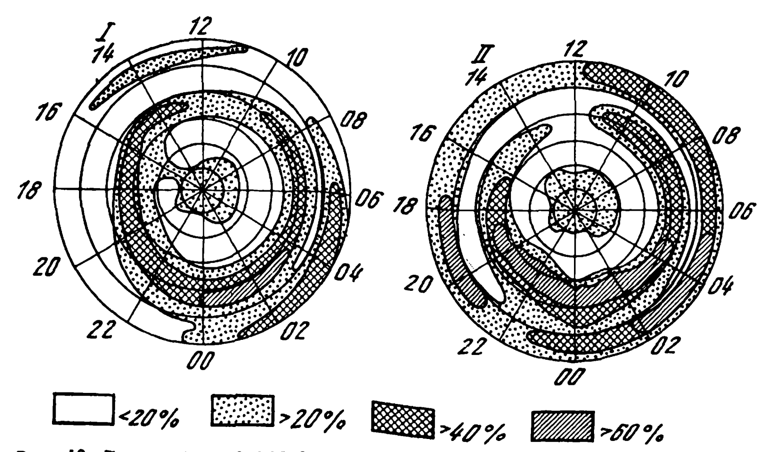


Рис. 46. Распределение частоты появления плоских E_s и E_s типа *a* для зимы (*I*) и лета (*II*) по данным за 1958 г. по А. С. Беспрозванной

Система координат: исправленная геомагнитная широта — местное время

ной системы N_2^+ в несколько раз сильнее, чем зеленая линия 5577 Å.

Кроме ППШ, в высоких широтах наблюдается авроральное поглощение. Оно обусловлено повышенной ионизацией в области *D* заряженными частицами, которые осаждаются приблизительно в зону полярных сияний. Распределение аврорального поглощения зависит от широты, времени суток, сезона, солнечной активности и магнитной возмущенности.

Выше области *D* располагается область *E*. В высоких широтах наряду с ионизацией, создаваемой в этой области электромагнитным излучением Солнца, под действием заряженных частиц создаются целые ионосферные слои. Это спорадические слои E_s различных типов. Их пространственное распределение отражает размещение в пространстве потоков заряженных частиц, которые их вызывают. Основные особенности широтно-временного распределения этих типов (см. рис. 46) следующие:

1. Имеются две области увеличенной вероятности появления спорадической ионизации — авроральная зона и приполюсная область. Максимальные значения вероятности появления E_s в первой зоне превышают 0,7, во второй составляют только 0,25—0,30.

2. Авроральная область увеличенной вероятности появления имеет сложный характер, в утренне-ночном секторе

она расщепляется на две зоны повышенной вероятности образования E_s. Более высокоширотная подобласть достигает максимума на широте 70°, более низкоширотная подобласть — на 62—63°. В щели между этими подобластями, которая центрируется на 66,5° и имеет протяженность по широте 2—3°, вероятность образования E_s минимальная. В послеполуденные и вечерние часы такое расщепление отсутствует и отмечается только один максимум в вероятности образования E_s на 69—70°.

Наибольшая вероятность образования E_s в этих двух подобластях авроральной области возможна в разное время суток: в высокоширотной она приходится на околополуночные часы, а в низкоширотной — на ранние утренние. Наблюдается существенное изменение положения подобластей и щели между ними и величины самой вероятности образования E_s в зависимости от уровня геомагнитной активности. В магнитоспокойных условиях расщепление авроральной области увеличенной вероятности образования E_s отсутствует (наблюдается один максимум в широтном ходе вероятности образования E_s). В магнитовозмущенные периоды отчетливо выражен второй максимум на 63°, сравнимый по величине с первым. Такой же широтный ход был зафиксирован и в полярных сияниях и магнитной активности.

Ионосферные слои E_s плоского типа и типа *a* наиболее часто проявляются в геомагнитоспокойные сутки. При умеренной активности вероятность образования E_s типа *a* уменьшается, в сильновозмущенных условиях он практически не наблюдается. Наблюдения показали тесную связь между увеличением электронной концентрации на высоте 120 км и уровнем геомагнитной активности. С увеличением геомагнитной активности вместо слоя E_s типа *a* наблюдался слой E_s типа *r*; когда же спокойные условия восстанавливались, снова можно было увидеть слой E_s типа *a*.

Спорадические слои E_s очень тесно связаны с полярными сияниями. Так, с увеличением активности последних возрастают критические частоты слоя E_s типа *r*. Суточный ход вероятности образования E_s типа *r* имеет три максимума в моменты, близкие к моментам наблюдения максимальных значений интенсивности водородной эмиссии в зените. При минимальной и максимальной солнечной активности полярные сияния, как правило, сопровождаются образованием спорадических слоев.

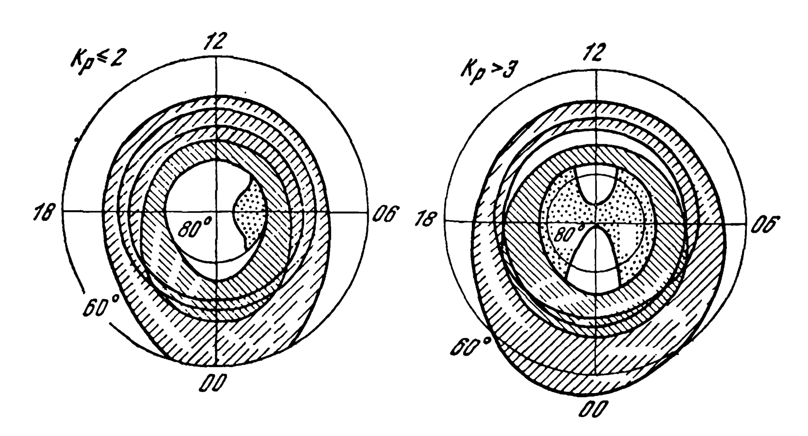


Рис. 47. Схематическое представление в системе координат инвариантная широта — местное время зон, в которых в зимних условиях наблюдается увеличение электронной концентрации на высоте 1000 км в магнитоспокойных и магнитовозмущенных условиях

Установлено, что спорадический слой *E* является чувствительным индикатором дискретных полярных сияний от слабых и субвизуальных до очень ярких и активных полярных сияний во время суббури.

Влияние высыпания заряженных частиц области *F* высоких широт прослеживается и в подобных областях, совпадающих по широте с овалом полярных сияний, концентрация электронов также повышенная. Эта область получила название плазменного кольца. Заряженные частицы, ответственные за повышенную ионизацию в области *F*, вызывают и полярные сияния. Плазменное кольцо, так же как и овал полярных сияний, с увеличением магнитной активности смещается в сторону более низких широт. При этом оно расширяется. В системе координат инвариантная широта — местное время о зонах повышенной концентрации электронов на высоте 1000 км можно судить из схемы рис. 47.

Область повышенной концентрации электронов характеризуется рассеянным характером отражений радиоволн и большой ото дня ко дню изменчивостью электронной концентрации. Во время суббури эта область неоднородностей расширяется и движется в сторону более низких широт, как и овал полярных сияний. В восстановительную фазу суббури, так же как и овал сияний, смещаются обратно в направлении к полюсу.

Экваториальная граница зоны неоднородностей дневного сектора соответствует экваториальной границе полярных сияний независимо от движения последних или фазы суббури. Ширина этой зоны в дневном секторе увеличивается на несколько градусов по широте на протяжении фазы расширения магнитосферной суббури. Установлена тесная связь между движениями полярного каспа, фазой суббури и положением зоны неоднородностей.

В ночном секторе овала полярных сияний зона ионосферных неоднородностей совпадает с областью, занятой эмиссией 6300 Å, которая простирается от 2 до 10° по широте вдоль овала. В ночном секторе в отличие от дневного в этой области появляются как дискретные, так и диффузные формы полярных сияний. Напомним, что зона неоднородностей и область эмиссии 6300 Å дневного сектора содержат только дискретные формы полярных сияний. Существует очень тесная связь между шириной этой зоны и активностью суббури во все фазы магнитосферной суббури, начиная от ее начала и даже после фазы восстановления.

Зона ионосферных неоднородностей в области F в ночном секторе овала полярных сияний вызывается низкоэнергичными электронами, приходящими из плазменного слоя магнитосферы. Поэтому меридиональные вариации пояса свечения 6300 Å и зоны неоднородностей отражают изменения в конфигурации этого слоя. Установлена количественная связь между интенсивностью эмиссии 6300 Å и параметрами слоя F_2.

Теперь рассмотрим ионосферную суббурю.

В настоящее время наиболее полно изучена природа суббури в самой нижней области ионосферы — D. Как известно, интенсивное высыпание заряженных частиц вызывает активное поглощение радиоволн. Последнее делает неэффективным применение в такой момент метода вертикального зондирования ионосферы. Зато можно измерять интенсивность космического радиошума (изменения интенсивности за счет поглощения его в нижней ионосфере), а это дает информацию о состоянии нижней ионосферы.

Интенсивная ионизация в нижней ионосфере, ответственная за поглощение радиоволн, вызывается электронами с бо́льшими энергиями, чем у электронов, которые создают видимые полярные сияния. Поэтому должна наблюдаться более тесная связь между суббурей в поглощении и суббурей в рентгеновском излучении.

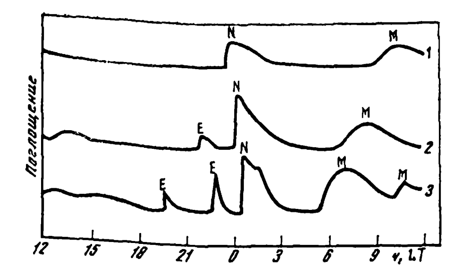


Рис. 48. Схема, иллюстрирующая суточную вариацию поглощения космического радиоизлучения

1 — довольно спокойный период;
2 — умеренно-возмущенный период;
3 — возмущенный период

Обратимся к схеме суточной вариации поглощения на типичной станции зоны полярных сияний (рис. 48). При этом выделим три типа поглощения: *E* — кратковременного, импульсного типа в вечерние часы, *N* — сильного с внезапным началом в околополуночные и ранние утренние часы, *M* — с постепенным началом в поздние утренние часы. Эта классификация основана на особенностях развития полярных сияний в период поглощения каждого типа.

Поглощение типа *E* связано с движением полярных сияний к полюсу в полуночном секторе в период суббури. Область поглощения расширяется к полюсу в фазе развития и сжимается к экватору в фазе восстановления.

Поглощение типа *E* связано с движущимся к западу изгибом. Наибольшая продолжительность поглощения этого типа частично обусловлена сильной концентрацией вторгшихся электронов вблизи центральной области изгиба, которая перемещается со скоростью около 2 км/с. Данное поглощение менее интенсивно, чем в случае типа *N*, хотя яркий изгиб может покрывать значительную часть небосвода. Видимо, вторгающиеся в область изгиба частицы имеют меньшую энергию, и большая их часть тормозится выше 100 км. Тогда они вызывают интенсивное свечение и только незначительное поглощение.

Если овал полярных сияний спускается до геомагнитной широты 65° в ранние вечерние часы, то спокойное полярное сияние и движущиеся к западу изгибы наблюдаются необычно рано. Это приводит к аномально раннему возникновению поглощения типа *E*. В таких случаях поглощение типа *N* также имеет тенденцию появляться раньше, чем обычно.

Связь между поглощением типа *E* и положительными магнитными бухтами либо отсутствует, либо очень слаба. Поглощение минимально в вечерние часы, когда бухты проявляются наиболее часто. Положительные магнитные

бухты регистрируются при прохождении движущихся к западу изгибов к полюсу от станции зоны полярных сияний.

Отрицательные магнитные бухты связаны с поглощением типов N и M. Отрицательная бухта наблюдается в тех случаях, когда движущийся к западу изгиб проходит немного севернее станции.

Поглощение типа M связано с дрейфующими к востоку полосами или пятнами. Этот тип поглощения характеризуется не только довольно плавным началом, но и отсутствием одновременного взрывообразного усиления яркости полярного сияния. Поглощение типа M (в отличие от E и M) обусловлено вторжением более жестких электронов. Последние проникают глубже в атмосферу, поэтому поглощение проявляется больше, а результирующее свечение меньше (вследствие эффективной дезактивации возбужденных атомов кислорода).

Статистические исследования показали, что поглощение типа M наиболее интенсивно в поздние утренние часы и часто охватывает полуденный сектор. В поздние утренние часы оно наблюдается на широтах зоны полярных сияний, а электроструя течет вдоль овала полярных сияний, т. е. севернее области поглощения. Поэтому отсутствует хорошая корреляция между магнитной активностью (интенсивность электроструи) и поглощением типа M.

Поглощение типа M в поздние утренние часы связано с развитием типичной полярной суббури в полуночном секторе (взрывообразным движением полярных сияний, резким началом отрицательных бухт и началом поглощения типа N). Поглощения типа N в полуночном секторе взаимодействуют с поглощением типа M в поздние утренние часы.

Развитие суббури в поглощении показано на рис. 49.

Вторжение заряженных частиц в высокоширотную атмосферу во время магнитосферной суббури связано с различными явлениями. Это возникновение электрических токов, которые служат причиной полярной магнитной суббури, а также изменение (увеличение) ионизации в различных областях ионосферы, прежде всего в области D. Последнее является суббурей в поглощении радиоволн.

Эти два явления мы уже рассмотрели. Но существуют и другие проявления магнитосферной суббури. Так, во время суббури энергичные электроны, вторгающиеся в верхнюю атмосферу в полярных областях, при столкновении с частицами верхней атмосферы порождают фотоны

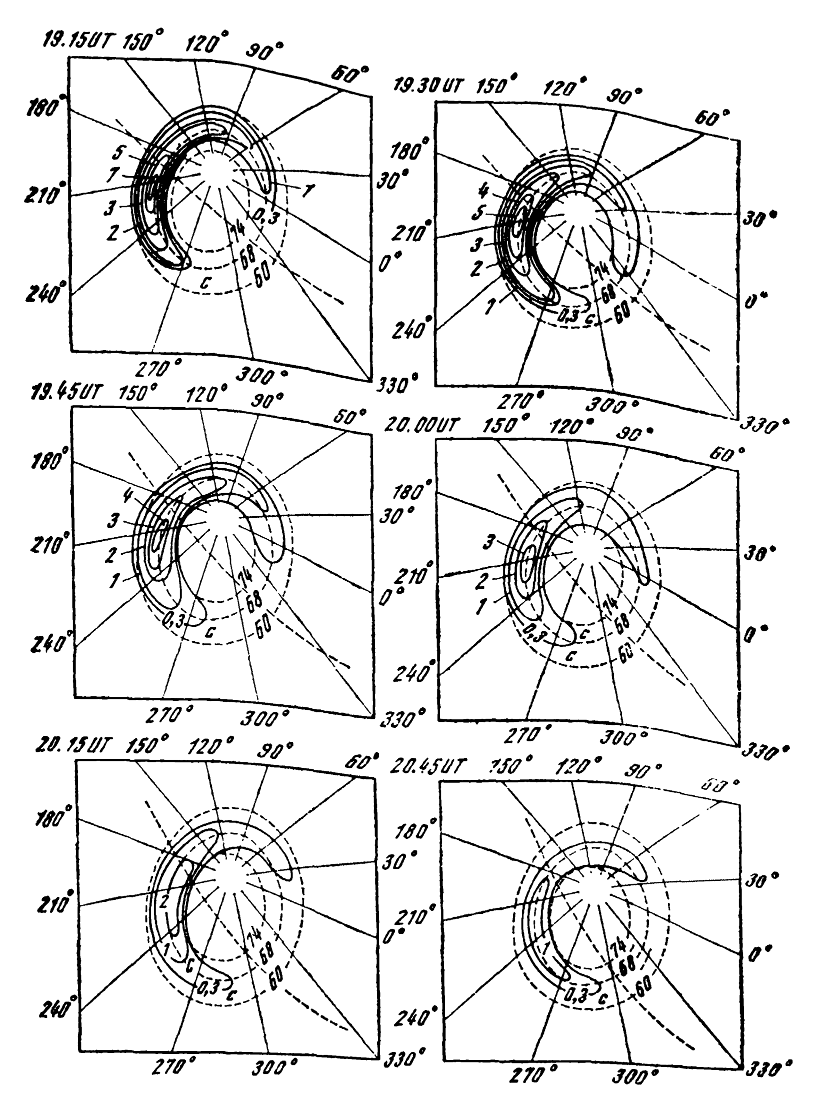


Рис. 49. Распределение аврорального поглощения во время магнитосферной суббури 15 янв. 1969 г. по данным сети риометров в северном полушарии

тормозного рентгеновского излучения, которые регистрируются аэростатами на высотах около 30 км. Это так называемая суббуря в рентгеновском излучении.

Кроме этого имеются и суббури в ОНЧ-излучении и в геомагнитных микропульсациях. Радиолокационные отражения от ионосферных неоднородностей (так называемые радиосияния) также выявляют зависимость от развития магнитосферной суббури.

Существует большое сходство во временных вариациях рентгеновского излучения и поглощения космического радиоизлучения. Всплески рентгеновского излучения связаны с поглощением типа *M*.

Рентгеновское излучение наиболее интенсивно в окрестностях полярной электроструи, т. е. его максимум совпадает с областью расширяющейся к полюсу выпуклости в полярных сияниях. Рентгеновское излучение наблюдается непосредственно под полосой активного сияния с нижним красным краем.

Определено, что во время магнитосферной суббури энергетический спектр электронов смягчается, а к концу суббури восстанавливается. Была также зафиксирована хорошая корреляция между всплеском рентгеновского излучения и прохождением изгиба полярного сияния.

В вечернем секторе ситуация иная. Здесь всплески рентгеновского излучения не сопровождаются смягчением их энергетического спектра (во время суббури). Они, видимо, не связаны с полярными сияниями или магнитными явлениями. Маловероятно, чтобы они были связаны и с движущимся на запад изгибом полярных сияний. Вечерние всплески рентгеновского излучения, по-видимому, контактируют с потоками энергичных электронов, которые вторгаются также в полуночный сектор, но дрейфуют вокруг Земли через полуденный меридиан.

Рентгеновское излучение в зоне полярных сияний в полуденном секторе, которое наблюдается регулярно, в большинстве случаев не связано с местной магнитной активностью. Поскольку в утреннем секторе энергичные электроны, вызывающие рентгеновское излучение, высыпаются вдоль зоны полярных сияний, а электроструя протекает севернее — в овале полярных сияний, то отмечается плохая корреляция этих двух явлений. Несмотря на это, всплески рентгеновского излучения в позднем утреннем секторе связаны с полярными суббурями и происходят

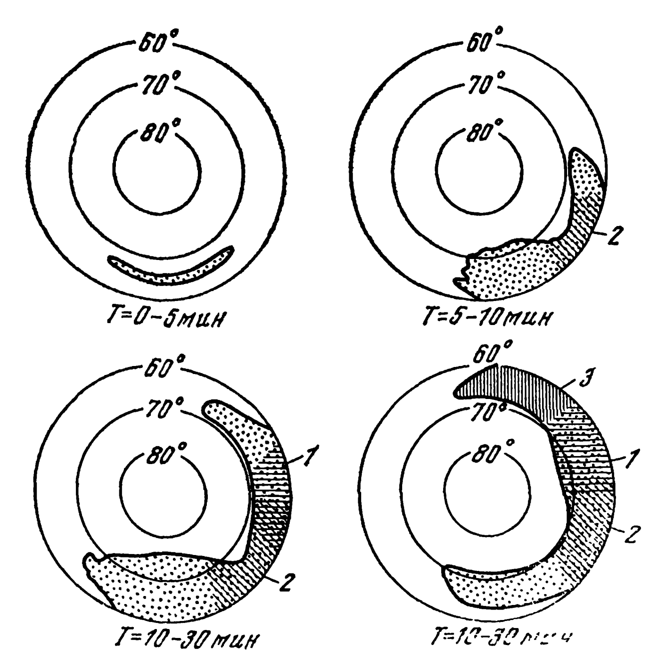


Рис. 50. Схема развития суббури в рентгеновском излучении

1 — микровсплески; 2 — пульсации; 3 — микровсплески и импульсы

одновременно с резкими отрицательными геомагнитными бухтами в полуночном секторе.

Для утренних всплесков рентгеновского излучения часто характерны квазииррегулярные пульсации. В некоторых случаях медленные пульсирующие всплески связаны с подобными пульсациями на риометрических и магнитных записях.

На рис. 50 приведена схематическая картина развития суббури по аэростатным наблюдениям рентгеновского излучения на высотах около 30 км. Во время самой ранней ее фазы рентгеновское излучение может регистрироваться вдоль узкой полосы, где наблюдается первое проявление суббури в полярных сияниях. Затем область вторжения энергичных электронов расширяется по всем направлениям. Расширение вдоль зоны сияний в утреннюю сторону продолжается до самого конца суббури.

Следует обратить внимание на то, что рентгеновское излучение отсутствует вдоль овала полярных сияний. Оно наблюдается вдоль вечерней части овала только вместе с движущимися к западу изгибами интенсивных полярных сияний.

С усилением авроральной и магнитной активности наблюдается радиоизлучение атмосферы на частотах в несколько килогерц. Оно появляется в виде всплесков, которые хорошо коррелируют с усилением свечения атмосферы в красной линии кислорода (6300 Å). Длительность этих всплесков около 3 ч. Иногда наблюдаются всплески в несколько раз более продолжительные. Было установлено, что ОНЧ-излучения связаны с полярными суббурями.

Здесь рассмотрим два вида такого излучения, а именно шипения и хоры. Шипение — это излучение, частотный спектр которого напоминает спектр теплового шума в ограниченной полосе частот. На слух это излучение воспринимается как шипение. Хор — это последовательность дискретных излучений, близко следующих друг за другом и часто накладывающихся одно на другое (по времени). Чаще всего наблюдаемая форма хора — множество повышающихся токов в диапазоне от 1 до 5 кГц со скоростью изменения частоты около 3 кГц/с.

Шипения появляются в основном в послеполуденные и вечерние часы примерно вдоль полярной границы овала полярных сияний. Во время ранней фазы суббури в ОНЧ-излучении, соответствующей взрывной фазе суббури в полярных сияниях, шипения наблюдаются по направлению как к полюсу, так и к экватору от овала, вдоль которого распространяется движущийся к западу изгиб. Это показано на рис. 51. Шипения отмечаются также в узкой области, располагающейся перед фронтом расширяющейся выпуклости в полярном сиянии. Хоры фиксируются в пределах выпуклости в полярных сияниях и вдоль овала полярных сияний в утреннем секторе.

Во время более поздней фазы суббури в ОНЧ-излучении, соответствующей фазе восстановления в ходе развития суббури в полярных сияниях, шипения могут наблюдаться вдоль пути движущегося к западу изгиба сияния. К этому времени изгиб успевает стать заметно слабее, и нижняя ионосфера уже не поглощает шипения. Область, в которой могут наблюдаться хоры, простирается вплоть до полуденного сектора и очень близка к области усиления поглощения и появления всплесков рентгеновского излучения.

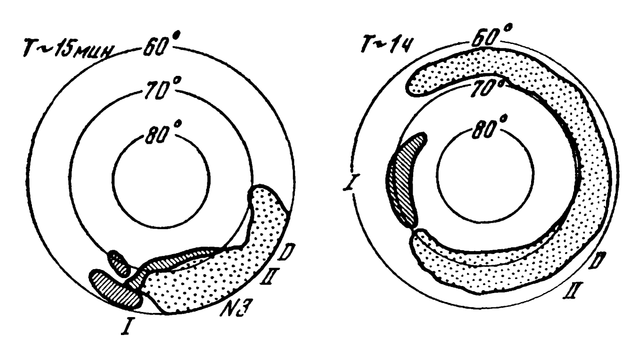


Рис. 51. Развитие суббури в ОНЧ-излучении

I — шипение; *II* — хоры

Суббуря в полярном сиянии тесно связана также с микропульсациями геомагнитного поля типа P_i2. Это колебания с периодом 40—150 с, которые наблюдаются в средних широтах во время начальной фазы развития бухтообразных возмущений. Микропульсации геомагнитного поля являются сверхнизкочастотными электромагнитными волнами. Внезапное начало микропульсаций тесно связано с полярной суббурей, которая проявляется во всплесках рентгеновского излучения, в поглощении радиоволн и в отрицательных бухтах с резким началом. Микропульсации опережают усиление поглощения космического радиоизлучения примерно на 100 с (при быстром приближении активных форм полярных сияний к пункту наблюдения). В самом начале отрицательной бухты наблюдается короткий импульсный всплеск пульсаций поля, который длится около 15 мин. За ним следуют непрерывные микропульсации, связанные со всплесками рентгеновского излучения.

Во время положительных бухт регистрируются микропульсации особого типа, середина частотного спектра которых дрейфует в сторону больших частот. В это время в вечерние часы (где имеют место положительные бухты) вблизи горизонта через направление на полюс проходит движущийся на запад изгиб полярного сияния.

В утреннем секторе также наблюдается значительное усиление микропульсаций во время полярных сияний. Для всплесков рентгеновского излучения, как правило, характерно более резкое начало и быстрое затухание, чем микропульсации.

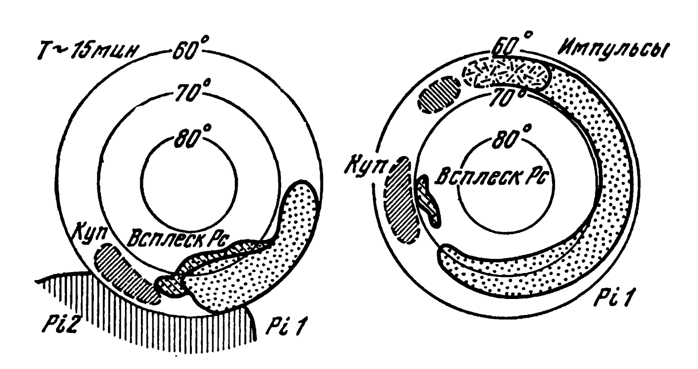


Рис. 52. Общая картина развития суббури в микропульсациях

В дневные часы (10—15 ч) микропульсации имеют квазисинусоидальный характер (как и модуляция всплесков рентгеновского излучения). Микропульсации рентгеновского излучения в полуденные часы ассоциируются с импульсными микропульсациями.

Во время взрывной фазы суббури в полярных сияниях к экватору от их овала отмечаются микропульсации типа КУП (колебания убывающего периода). Всплески P_i2 наблюдаются вдоль узкой области дальше к полюсу от расширяющейся выпуклости полярного сияния (рис. 52). Пульсации P_i2 наиболее четко фиксируются в средних широтах в позднем вечернем секторе.

В фазу восстановления суббури в полярном сиянии дальше к экватору от движущегося на запад изгиба полярного сияния наблюдаются колебания типа КУП. Область, в которой наблюдаются пульсации P_i1, сильно расширяется вплоть до полуденного сектора. Это расширение тесно связано с поглощением типа M, со всплесками рентгеновского излучения и ОНЧ-излучения типа D.

СПЕКТРЫ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Изучая спектры полярных сияний, мы получаем информацию о верхней атмосфере и о вторгающихся потоках заряженных частиц. Попытаемся схематически представить энергетические уровни и переходы электронов из одного уровня на другой, при которых излучаются кванты света, на примере самого простого атома — атома водорода (рис. 53).

Как известно, атом водорода состоит всего из двух частиц: протона, который является ядром, и вращающегося вокруг него одного электрона. Нейтрона в ядре водорода нет. Электрон, который вращается вокруг ядра, может иметь несколько значений энергий. Если на рис. 53 по вертикальной оси отсчитать энергию, то разрешенные энергетические уровни можно изобразить отрезками прямых (1—5).

Как было сказано выше, электрон в атоме всегда стремится уменьшить свою собственную энергию — перейти на более низкий энергетический уровень (на рис. это показано стрелками). Каждый такой переход сопровождается излучением света с определенной частотой (т. е. определенной энергией). Переходы электрона на один и тот же уровень с разных уровней с большей энергией составляют серию излучаемых квантов; частота излучаемого света в данной серии может быть рассчитана по довольно простым формулам. Эти серии имеют свои названия (в честь их открывателей). Так, первая серия в атоме водорода называется серией Лаймана и обозначается буквой L с индексами α, β, γ, вторая — серией Бальмера — буквой H с аналогичными индексами и т. д.

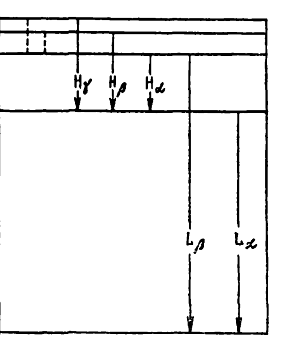


Рис. 53. Схема энергетических уровней атомов водорода

Показанная на рис. 53 схема энергетических уровней очень упрощена даже для случая одного орбитального электрона. Если атом поместить в сильное магнитное поле, то энергетические уровни расщепляются. Это можно определить по тому, какой частоты свет, излучаемый атомом. Если он излучен на какой-либо определенной частоте, то в сильном магнитном поле появится излучение на частотах, которые меньше и больше ее.

Энергетические уровни атомных электронов обладают еще одним свойством: вероятность перехода электронов на разные уровни различна. Некоторые уровни, соответствующие таким значениям энергии, которые электроны принимают очень неохотно, с малой вероятностью, называются запрещенными.

Электроны, как уже говорилось, стремятся приблизиться по-возможности ближе к ядру, но при этом им приходится отдавать лишнюю энергию в виде излучения. В обратной ситуации электрон поглощает квант (порцию) света. Тогда его энергия увеличивается, и он вынужден переселиться на более удаленную от ядра орбиту. Атом с таким электроном называется возбужденным. В этом состоянии атом долго находиться не может: как правило, через $1 \cdot 10^{-8}$ с этот электрон излучает лишнюю порцию света, возвращаясь при этом в свое основное, нормальное состояние, т. е. на прежний свой энергетический уровень.

Дело обстоит иначе, когда электрон находится на запрещенном энергетическом уровне. Энергетический уровень, с которого запрещены переходы на более низкие, называется метастабильным, или почти стабильным. Переход электрона, находящегося на этом уровне, на более низкие маловероятен. Но этот электрон может перейти на более высокий энергетический уровень, если поглотит соответствующий квант света. Возможна ситуация, когда электрон после этого переходит на более удаленный уровень (с большой энергией), который является метастабильным. Таким путем электрон оказывается как бы «загнанным» на уровень, уйти из которого ему очень сложно: вероятность перехода из метастабильного уровня на более низкие энергетические уровни очень мала (т. е. для этого необходимо весьма продолжительное время).

Основным объектом при изучении полярных сияний является излучаемый при этом свет (его интенсивность, частота). Все излучение, включающее различные цвета (т. е. различные частоты), принято называть спектром излучения. Он может быть непрерывным, т. е. иметь все частоты. В видимом участке спектра это выражается в плавном переходе одного цвета в другой. Спектр излучений может состоять из излучения с определенными частотами. Если его зарегистрировать спектроскопом, то излучению определенной частоты будет соответствовать одна линия. Поэтому такой спектр назвали линейчатым. Он получается при излучении газов, которые состоят из атомов.

Если иметь дело с излучением не атомов, а молекул, то картина энергетических уровней сильно усложняется. В этом случае излучается свет не с определенными дискретными частотами, а в определенных диапазонах (полосах), где излучение непрерывное. Такой спектр излучения назы-

вается полосчатым. С частотой связано и количество энергии, содержащееся в данном излучении. Чем больше частота, тем больше энергия кванта света. Частота, умноженная на постоянную величину (постоянную Планка), дает величину энергии данного кванта излучения.

Всякое излучение характеризуется или частотой или длиной волны. Видимый и невидимый свет, рентгеновские лучи и радиоволны имеют одну и ту же физическую природу. Все это — электромагнитные волны, которые отличаются друг от друга только частотой или длиной волны. Все эти излучения представляют непрерывный спектр электромагнитных колебаний (рис. 54). Если рассматривать весь спектр электромагнитного излучения, то длины волн будут изменяться от сотен километров до миллионных долей миллиметра. Отметим, что человеческий глаз способен воспринимать только незначительную часть всего спектра электромагнитного излучения, которое пронизывает все окружающее нас пространство. Это диапазон с длинами волн от 7600 Å (темно-красный цвет) до 3800 Å (фиолетовый цвет).

Как известно, по частоте (или длине волны) излучения, которое порождает данный атом, можно определить, какому химическому элементу он принадлежит. Это значит, что, находясь на поверхности Земли и регистрируя излучение атмосферных газов на высотах в сотни километров, можно выяснить химический состав этих газов. Такой способ определения химического состава называется спектральным анализом, поскольку в данном способе анализируется спектр излучения данного вещества.

Методом спектрального анализа был определен не только химический состав верхней атмосферы (который до запуска ракет и спутников не мог быть исследован прямыми методами), но и химический состав фотосферы Солнца. Основные результаты исследования полярных сияний получены, как уже отмечалось, путем анализа спектра излучения атмосферных газов.

На верхней границе земной атмосферы взаимодействие энергичного электрона с атомами атмосферного газа мало эффективно. Во-первых, электрон движется очень быстро и не успевает взаимодействовать с атомами. Во-вторых, плотность атмосферы там очень мала и вероятность того, что электрон встретит на своем пути атом, также невелика. По мере углубления энергичного электрона в атмосферу ситуация постоянно меняется: плотность атмосферы быст-

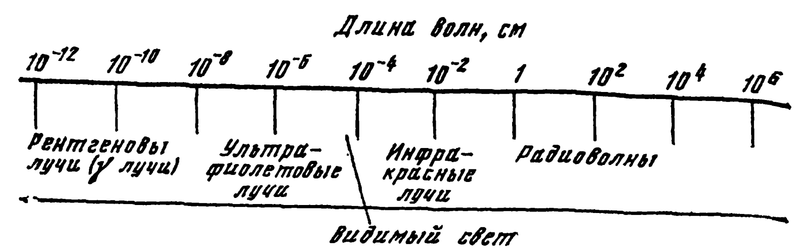


Рис. 54. Спектр электромагнитных излучений

ро увеличивается, а энергия электрона постепенно уменьшается. Электрон при каждом своем столкновении с нейтральным атомом выбивает из него по одному орбитальному электрону. Нейтральный атом превращается в положительно заряженный ион. Выбитый электрон уходит из атома и становится свободным. Если этот электрон выбит не из внешнего уровня, то его место займет более внешний электрон. Мы уже говорили, что этому электрону надо отдать излишек энергии в виде излучения кванта света. На один акт ионизации (отрыв одного электрона из атома) энергичный электрон тратит строго определенную долю энергии и продолжает лететь дальше, пока не встретит очередной атом. Так, один энергичный электрон на своем пути способен ионизовать десятки атомов атмосферного газа. Чаще всего происходит отрыв одного электрона из атома. Если из атома оторваны два орбитальных электрона, то этот атом дважды ионизован. В атмосфере почти все ионы являются однократно ионизованными атомами.

Когда энергичный электрон взаимодействует с атомом, то происходит не только ионизация атома, но и его возбуждение. Как говорилось выше, атом не может долго находиться в возбужденном состоянии. Орбитальный электрон из возбужденного уровня переходит на свой обычный энергетический уровень, излучая при этом квант света. Это излучение и есть полярное сияние. Таким образом, все основные мощные эмиссии (излучения) полярных сияний возникают в основном в результате ударного возбуждения заряженными энергичными частицами (электронами и протонами). Как только заряженная частица сталкивается с атомом атмосферы, он сразу переходит в возбужденное состояние и испускает квант света. Тогда мы можем с поверхности Земли наблюдать полярные сияния.

Насколько эффективно энергичные заряженные частицы воздействуют на атомы и молекулы атмосферы зависит от их скорости. Если скорости электронов, протонов и ионов равны, то и эффективность их воздействия одинаковая. Но ионы и протоны в тысячи раз тяжелее электрона. Поэтому при равных скоростях энергии протона и иона в тысячи раз больше энергии электрона.

Хорошо установлено, что быстрые электроны образуют в воздухе около трех пар ионов на каждые 100 эВ первоначальной энергии. Таким образом, электрон с энергией 1 кэВ при полном израсходовании этой энергии образует около 30 пар ионов.

Ионизация атомов и молекул начинается тогда, когда энергия электрона превышает энергию ионизации атома или молекулы. Ионы действуют так же, если их скорости равны скорости электронов. Ионизация происходит наиболее эффективно, если скорость электрона в несколько раз больше, чем та минимальная скорость, при которой начинается ионизация. Это значит, что вначале, на верхней границе атмосферы, где энергия электронного пучка еще большая (и скорость тоже), электрон производит ионизацию атомов неэффективно. И только когда его энергия уменьшается (фактически почти в конце своего пути) электрон наиболее эффективно взаимодействует с атомами, вызывая их ионизацию (рис. 55). Собственно, именно электроны этих энергий интересны для рассматриваемой здесь проблемы полярных сияний; они проникают на те высоты атмосферы, где наблюдаются сияния.

Процесс ионизации происходит так, что первичный электрон выбивает из атома орбитальный электрон (назовем его вторичным), который получает от первичного электрона достаточную энергию, чтобы самому быть способным ионизовать другие атомы. Процесс носит характер каскадного ливня. При подсчете общей ионизации (числа пар ионов) получается, что большая часть ионов (70%) создается именно вторичными электронами. Каждый вторичный электрон уносит энергию около 90 эВ. Эта энергия может быть израсходована на ионизацию и возбуждение атомов и молекул. Возбуждение нейтральных частиц вызывается в значительной степени вторичными электронами.

Когда электрон израсходует свою энергию и ее недостаточно, для того чтобы ионизовать атомы, он способен остатки своей энергии передать атому или молекуле путем их возбуждения. Затем эти атомы или молекулы, переходя

из возбужденного состояния в основное, излучают эту энергию в виде света различной длины волны (т. е. различного цвета).

Возбужденные состояния молекул бывают трех видов. Во-первых, они могут быть связаны с конфигурацией электронов в молекуле. Это так называемое электронное возбуждение. Во-вторых,— с колебаниями атомов относительно друг друга. Это колебательное возбуждение. В-третьих,— с вращением атомов относительно друг друга. Это вращательное возбуждение. Энергия вращательного возбуждения незначительна по сравнению с энергиями электронного и колебательного возбуждений.

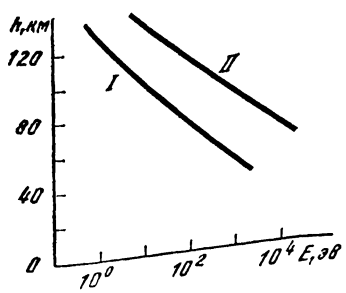


Рис. 55. Глубина проникновения в атмосферу электронов (I) и протонов (II) различных энергий

Свечение атомов и молекул, которое представляет собой полярные сияния, происходит не только в результате действия энергичных электронов, при котором возникает прямое возбуждение первичными или вторичными электронами. Возбуждение спектров полярных сияний имеет место также при тепловых соударениях, т. е. при соударениях атомов и молекул с частицами, имеющими тепловые скорости. Если у этих частиц не хватает энергии, чтобы произвести ионизацию, то они возбуждают атомы и молекулы. При разогреве ионосферной плазмы электроны приобретают большие скорости, чем скорости тепловых электронов. Поэтому возбудить атомы и молекулы могут и электроны разогретой ионосферной плазмы. Наконец, возбуждение может вызываться и механизмами электрического разряда и вследствие разогрева электрическими полями.

Спектр полярного сияния состоит из многочисленных линий излучения и полос, которые принадлежат атомам и молекулам кислорода и азота, а также их ионам. В спектрах полярных сияний были обнаружены и все запрещенные атомарные линии излучения атомарного кислорода [O I], [O II] и азота [N I], [N II], которые находятся в видимой области спектра. Эти излучения возбуждаются электронами с энергиями около 10 кэВ. Кроме этих линий,

в спектрах полярных сияний часто присутствуют также три первые линии серии Бальмера атомов водорода: H_α, H_β и H_γ. Наибольшую интенсивность имеет излучение в линии на длине волны 6563 Å. На основании анализа спектров сияний на ряде ИСЗ было установлено, что водородные сияния вызываются протонами, средняя энергия которых равна 5—30 кэВ.

Водородные спектральные линии существенно расширены. Если вести наблюдения в направлении зенита, то они оказываются несколько смещенными в область более коротких волн. Это смещение происходит за счет того, что излучающие частицы (водород) движутся в направлении к наблюдателю. Это смещение вызвано эффектом Допплера.

Тот факт, что спектральные линии водорода оказались сдвинутыми в сторону ультрафиолетового конца спектра, свидетельствует о том, что водород двигался из космоса в сторону наблюдателя.

Самая яркая линия в спектре полярного сияния зеленая, длина волны ее равна 5577 Å. Эта линия принадлежит нейтральным атомам кислорода. Излучение в зеленой линии придает сияниям зеленоватую окраску. Напомним, что наибольшая чувствительность человеческого глаза приходится на длину волны 5550 Å (очень близко к линии 5577 Å). На длине волны 6300 Å чувствительность глаза уменьшается в 10 раз по сравнению с чувствительностью на длине волны 5550 Å.

Большую интенсивность в спектре сияний имеют полосы, которые излучает молекулярный азот. Имеется несколько систем таких полос.

В результате ионизации

$$N_2 + e \rightarrow N_2^+ + e + e$$

некоторые молекулы азота образуются в возбужденном состоянии $B^2\overline{Z}$, которое является верхним уровнем для полос первой отрицательной системы. Если это так, то в некоторых случаях будет излучаться фотон в сильных полосах 3914 и 4278 Å. Наиболее вероятное значение для отношения между полной скоростью ионизации в атмосфере, включая ионизацию кислорода, и числом фотонов λ3914 Å составляет около 25. Для полос λ4278 и 4709 Å соответствующие отношения будут около 75 и 300, принимая отношение 1,0 : 0,34 : 0,075 соответственно для интенсивностей полос λ3914, 4278 и 4709 Å. Эти отношения очень слабо

зависят от энергии первичных частиц: отношения между эффективными сечениями рассматриваемых процессов лишь слегка меняются с энергией электронов.

Отрицательная система полос молекулярного азота расположена в фиолетовой и синей частях спектра. Излучение производят положительные ионы молекулярного азота (N_2^+). Самые сильные полосы этой системы имеют длины волн 3914, 4278 и 4708 Å.

Первая положительная система полос излучения молекулярного азота наблюдается в красной и инфракрасной частях спектра. Главные полосы этой системы имеют длины волн 5991 и 5867 Å. Вторая положительная система полос интенсивнее, чем первая. Она преобладает в голубой и ультрафиолетовой частях спектра с длинами волн 3997 и 4059 Å. Обе положительные системы излучаются нейтральными молекулами азота (N_2).

Название «положительная», как и «отрицательная», чисто условное: первые наблюдаются в разрядной трубке вблизи положительного электрода, отрицательная система полос — вблизи отрицательного.

Ионы молекулярного кислорода также излучают в зеленой и красной частях спектра (полосы отрицательной системы) с длинами волн 5577 и 6300 Å.

Для изучения процессов возбуждения спектров полярного сияния важно знать детальное распределение интенсивности в каждой молекулярной системе полос.

Рэлей, исследуя зеленую линию спектра полярного сияния, определил измерительную единицу для количественного выражения этих измерений. Позднее, в 1956 г., эта единица интенсивности свечения атмосферы была названа Рэлеем. Интенсивность свечения в один Рэлей (R) соответствует излучению миллиона квантов, которые испускаются в одну секунду в столбе атмосферы сечением в 1 см^2. Единица в 1000 раз большая названа килорэлей (kR).

На геомагнитной широте около 65° в 80% случаев наблюдаются сияния с интенсивностью кислородной линии 5577 Å от 0,75 до 11,5 kR (только 0,4% времени интенсивность превосходит 100 kR). Интенсивность красной кислородной линии 6300 Å составляет от 5 до 100 kR. Свечение азотной линии 3914 Å с интенсивностью по шкале яркости более 3 баллов (когда яркость сравнима с яркостью кучевых облаков, освещенных луной) соответствует 100 kR.

Интенсивность сияний (а также их интегральная яркость) может изменяться примерно в 10 тыс. раз. Все сияния разделены на 4 балла согласно международной шкале яркости. Интенсивность по мере увеличения балла на единицу увеличивается в 10 раз. Нулевой балл, введенный наряду с 4 баллами, означает, что полярные сияния визуально не фиксируются и могут быть обнаружены только инструментально. Интенсивность этого сияния составляет 0,1 kR.

Представляет большой научный интерес отношение интенсивностей излучения отдельных линий, особенно зеленой линии кислорода 5577 Å, и первой отрицательной системы полос N_2^+.

Измерение абсолютных величин интенсивности излучения в отдельных линиях все еще встречает определенные трудности. Так, для абсолютных измерений необходимо проводить калибровку приборов, что ограничивает точность измерений. Кроме того, прибор регистрирует весь свет, который излучается в пределах объема пространства, охватываемого полем зрения прибора вдоль луча зрения. По этой причине привязать измерение интенсивности к определенным точкам полярного сияния трудно или даже невозможно. Этими и другими трудностями можно объяснить тот факт, что измерения интенсивности слабых излучений все еще малочисленны. Эти измерения чаще всего только указывают на сам факт существования излучений. Более того, даже измерения более сильных излучений в значительной степени ненадежны для определения абсолютных величин интенсивностей.

С Земли с помощью спектрографов с высоким разрешением, а также обычными фотографическими методами можно проводить измерение характеристик излучения в области спектра с длинами волн от 3300 до 9000 Å.

Измерение интенсивности излучения различных линий полярных сияний имеет еще один аспект. Дело в том, что существует тесная связь между интенсивностью свечения в полосах первой отрицательной системы N_2^+ (наиболее сильными являются линии 3914 и 4278 Å) и количеством электронов, создающихся при ионизации атмосферы тем пучком электронов, который вызывает это излучение. Для изучения распределения электронов в полярной ионосфере эта информация весьма важна. Основная информация об электронной концентрации получается с помощью радиометодов, главными из которых являются зондирование

ионосферы с поверхности Земли (или с самолета) и с помощью ионозондов, установленных на ИСЗ. В первом случае получаем информацию о распределении концентрации электронов «внутренней» ионосферы, т. е. ионосферы ниже главного максимума ионизации в области на высоте 300—400 км. Во втором (при зондировании со спутника) — ионозонд дает информацию о внешней ионосфере, т. е. выше этого максимума. В периоды, когда происходит интенсивное вторжение заряженных частиц, особенно больших энергий, способных достигать высот нижней ионосферы (100 км и ниже), метод вертикального зондирования с Земли становится неприменимым. Радиоволны не возвращаются из ионосферы и, таким образом, не приносят информацию о распределении электронов: они поглощаются в нижней ионосфере. Зато препятствий для измерения интенсивности излучения линий 3914 и 4278 Å нет. По этим интенсивностям можно рассчитать количество электронов, образованных пучком вторгающихся электронов. В частности, по этой причине излучение в линиях 3914 и 4278 Å измерялось очень часто и поэтому известно весьма подробно. Важно отметить, что распределения по высоте интенсивностей излучения линии кислорода 5577 Å и указанных выше полос первой отрицательной системы N_2^+ очень похожи между собой.

В процессе наблюдений удалось обнаружить линии излучения для всех возбужденных метастабильных состояний основных конфигураций нейтральных и однократно ионизованных атомов азота и кислорода. Чаще всего отмечаются излучения в результате таких переходов атомарного кислорода: $^1D-^1S$ (5577 Å) и $^3P-^1D$ (6300 и 6364 Å) и атомарного азота $^2D-^2P$ (10 395 и 10 404 Å) и $^4S-^2P$ (3466 Å). Эти линии являются запрещенными. Они представляют интерес потому, что некоторые из них (особенно 5577, 6300 и 6364 Å) имеют умеренную интенсивность и легко измеряются. Кроме того, по интенсивности излучения в этих линиях можно определить характеристики заряженных частиц, которые вызывают эти излучения. Для метастабильных атомов весьма важны столкновения, при которых они переходят в основное состояние (дезактивирующее). В результате этих столкновений энергия метастабильных атомов переносится к другим атомам и молекулам.

Наиболее интенсивные системы молекулярных полос излучения соответствуют разрешенным переходам. В ви-

димой части спектра преобладают первая и вторая положительные системы полос N_2 и первая отрицательная система полос N_2^+, полосы Мейнела N_2^+ доминируют в красной и ближней инфракрасной областях спектра, а полосы Лаймана—Бирджа—Хопфильда N_2 — в ультрафиолетовой области.

Первая отрицательная система полос O_2^+ слабая, но присутствует постоянно и в большинстве случаев легко наблюдается в полярных сияниях на малых высотах.

Примерно до 1953 г. фотографические спектры были единственным средством получения распределений интенсивности в спектре полярного сияния. К сожалению, эти измерения имели большие погрешности. Применение фотоэлектрических приемников произвело революцию в измерениях интенсивности в спектре полярного сияния. В этом методе ошибки связаны со стандартными источниками для калибровки. Поэтому данных об интенсивности излучений (особенно слабых) все еще недостаточно.

Электроны или протоны данной энергии отдают свою энергию в ограниченной области высот в атмосфере. Поэтому возбуждение атомов или молекул (и ионов) на определенной высоте в значительной степени вызываются электронами или протонами в ограниченном интервале энергий. Следовательно, спектральные характеристики определяются видом частицы (электрон или протон) и ее удельной энергией, а также плотностью атмосферы и ее составом. Поэтому большинство резко выраженных вариаций в спектре сияния обусловлено именно вариациями его высоты.

Спектральные различия, которые замечены между сияниями разных типов, также, видимо, обусловлены высотными изменениями (вариациями).

Полярные сияния типа *A* и красные дуги, относящиеся к красным полярным сияниям с сильными красными линиями 6300 Å, возникают на больших высотах. Сияния типа *B*, которые характеризуются сильной красной нижней границей, образуются очень низко в атмосфере (от 70 до 90 км).

Хорошие количественные измерения спектров полярных сияний трудно получить по следующим причинам:

1. Из-за сложной структуры полярного сияния, причем наблюдатель с Земли автоматически суммирует эмиссию вдоль луча зрения своего прибора.

2. Количественные измерения спектральных интенсивностей очень трудоемки и даже относительные измерения сильно подвержены погрешностям калибровки, когда разность длин волн велика.

3. Атмосферное рассеяние и поглощение света в значительной степени искажают распределение интенсивности, особенно в коротковолновом диапазоне, где сильно рэлеевское рассеяние, и в инфракрасной области, где преобладает поглощение. Учет рассеяния и поглощения составляющими воздуха, содержание которых переменно, всегда сложно. В случае протяженного источника света, который рассеивается из пучка, излучение частично компенсируется светом из других частей источника, рассеянным в пучок. Поэтому астрономические таблицы атмосферной экстинкции не могут быть применимы. Они пригодны только для точечных источников.

В случае сияния видимое ослабление вследствие рассеяния уменьшается примерно наполовину: в целом около половины рассеянного света уходит вверх и приблизительно столько же направлено вниз. Из-за изменения содержания водяного пара, пыли и других загрязнений рассеяние и поглощение могут значительно изменяться со временем.

Все указанные причины приводят к тому, что имеющиеся данные о спектрах полярных сияний являются недостаточно точными и настоятельно необходимо иметь более надежные количественные измерения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ В ОБЛАСТИ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Тепловые атомы и молекулы, излучающие в определенных линиях спектра, находятся в постоянном и беспорядочном движении. За счет их движения будет происходить допплеровское смещение линии излучения. По этому уширению можно измерять температуру газа, причем излучающие возбужденные атомы и молекулы должны находиться в тепловом равновесии с другими частицами атмосферного газа. Только при этом условии существует однозначная связь между энергиями возбужденных атомов и молекул и температурой атмосферы.

В этом методе обычно измеряют допплеровский профиль запрещенных линий кислорода 5577, 6300 и 6364 Å.

Время жизни атомарного кислорода в метастабильном состоянии достаточно для восстановления теплового равновесия с окружающей атмосферой, которое в процессе возбуждения нарушается. Для атомов $O('S)$ оно равно около 0,7 с, тогда как частота столкновений на высотах 100—170 км изменяется от 10^3 до 10^{-1} с. Ниже 300 км тепловое равновесие будет успевать восстанавливаться и для атомов $O('D)$, время жизни которых 110 с.

Выбор указанных линий излучения хорош и тем, что самопоглощение в этих линиях мало. Импульс возбуждающего электрона мал (из-за малости массы последнего). Поэтому при прямом возбуждении атомарного кислорода электронным ударом скорость атомов изменяется несущественно.

При измерении температуры атмосферы допплеровским методом необходимо измерять допплеровское уширение линии излучения всего в 0,01 Å. Интерферометры Фабри-Перо с оговорками годятся для таких измерений, так как необходимое время сканирования их при этом должно быть не менее 15 с. Лучшие результаты дает использование интерферометра Майкельсона с компенсацией поля.

Результаты измерения температуры атмосферы допплеровским методом показали, что она за 2—3 мин может меняться на 100 К. Было также получено, что с увеличением яркости свечения допплеровская температура уменьшается. Даже при кратковременных изменениях интенсивности изменяется температура. Такая зависимость связана с тем, что высота полярного сияния зависит от характеристик вторгающихся частиц, а именно их энергии.

Второй метод определения температуры атмосферы связан с распределением молекул по вращательным энергиям, которое влияет на распределение интенсивности внутри полосы излучения. Данный метод применяется главным образом к полосам первой отрицательной системы азота N_2^+. В фиолетовой части спектра, где эти полосы наиболее интенсивны и их легко измерять, вращательная температура такова, что распределение энергии среди вращательных линий можно достаточно точно измерить. Самопоглощéние для этих полос мало из-за низкой концентрации ионов N_2^+. В молекулярных полосах распределение интенсивности вращательных уровней удобно для целей измерения температуры: большинство вращательных уровней населено.

Распределение населенности очень чувствительно к температуре газа. Однако и этот метод сопряжен с большими сложностями, связанными со структурой полос, их интенсивностью и пространственным разрешением, а также с трудностью точно определить высоту полярного сияния. Вращательные линии заметно перекрываются, а слабые полосы сильно блендуются другими эмиссиями полярных сияний. Метод, естественно, дает бóльшую точность для случаев более интенсивных полярных сияний (это позволяет взять меньше время измерения).

Установлено, что лучше всего использовать измерение интенсивности полос (0—0), (0—1) первой отрицательной системы N_2^+ с длинами волн 3914 и 4278 Å.

Поскольку время жизни возбужденных молекул очень мало, то тепловое распределение определяется нейтральными молекулами, находящимися в основном состоянии.

Был изготовлен «температурный фотометр» с двумя узкополосными фильтрами, центрированными на длины волн таким образом, чтобы интенсивности излучений, пропускаемых фильтрами, были чувствительны к вращательной температуре. Измерения проводились за 1 с. С помощью этого прибора был измерен высотный градиент температуры, равный 6 К/км.

Использование фотоэлектрических спектрометров дало наиболее надежные измерения вращательной температуры. Эти измерения также дали величину высотного градиента 5—6 К/км.

Было установлено, что несколько раньше периода распада активных форм полярных сияний вращательная температура несколько выше нормальной, а после фазы распада — ниже ее.

Таким образом, благодаря оптическим наблюдениям полярных сияний можно узнать температуру атмосферы с временным разрешением порядка секунд и с точностью 10% и даже лучше. Такие измерения позволяют непрерывно следить за температурой и ее изменениями в зависимости от солнечного цикла и времени года, а также в течение ночи и в периоды возмущений. Оптические измерения температуры позволяют определить высоту диффузных форм полярных сияний, которую невозможно измерить параллактическим методом.

РАДИОСИЯНИЯ

Мы говорили о том, что полярная ионосфера очень сильно отличается от ионосферы средних широт. Это отличие состоит прежде всего в том, что источник ионизации, которому обязана своим существованием полярная ионосфера, нерегулярен во времени и неоднороден в пространстве. Кроме того, в полярной ионосфере содержатся неоднородности электронной концентрации различных размеров и с различными временами жизни. Все эти особенности полярной ионосферы не могут не сказываться на распространении радиоволн различных диапазонов в высоких широтах.

Так, еще в 30-е годы было обнаружено, что можно установить надежную связь между корреспондентами в Арктике, если радиоволну направлять не на корреспондента, а в направлении севера. Напомним, что радиосвязь в обычных условиях на коротких волнах идет путем зеркального отражения радиоволны от ионосферного слоя. При этом падающая под определенным углом на ионосферный слой и отраженная от этого слоя радиоволна проходят в одной плоскости. Угол падения и угол отражения радиоволны равны. Чтобы отражение радиоволны было зеркальным, надо, чтобы ионосферный слой был достаточно толстым и не содержал неоднородностей электронной концентрации.

В полярной ионосфере ситуация значительно сложнее: там содержатся не только ионосферные неоднородности, но и горизонтальные градиенты электронной концентрации. Поэтому радиоволны не обязательно будут распространяться в плоскости большего круга. Кроме того, появляются различные возможности отражения и рассеяния радиоволн (вперед, назад, под углом к направлению распространения и т. д.). Отсюда проблема распространения радиоволн в высоких широтах очень сложная, чем и объясняется трудность обеспечения там надежной и стабильной радиосвязи, уверенной работы радионавигационных и радиолокационных систем и других установок, использующих при своем функционировании распространяющиеся радиоволны.

Мы не можем здесь рассматривать всю проблему особенностей распространения радиоволн в высоких широтах, а рассмотрим только особенности, которые очень тесно связаны с полярными сияниями.

Радиосияния — это отражение радиоволн от областей

в полярной ионосфере, занятых полярными сияниями. Отсюда и термин «радиосияния» наряду с термином «полярные сияния». По крайней мере длительное время считалось, что отражение радиоволн происходит в точности от полярных сияний и радиометодом можно исследовать закономерности самих полярных сияний. В дальнейшем, при более полном изучении явления, оказалось, что связь радиосияний с полярными сияниями более сложная, тем не менее оба явления являются проявлением одного и того же процесса — вторжения потоков заряженных частиц в ионосферу высоких широт.

Профессиональные исследования радиосияний начались сразу же после второй мировой войны. До этого радиосияния интересовали только радиолюбителей, которые успешно использовали это явление для установления радиосвязи со своими корреспондентами.

В 1947 г. на радиолокационной установке, которая предназначалась для исследования метеоров, в ночь с 15-го на 16 августа, были зарегистрированы интенсивные отраженные сигналы. Антенна радиолокатора была направлена в зенит и имела слабую направленность. В зените и на севере в это время были видны полярные сияния. Интенсивность отражения была настолько сильной, что она не могла быть объяснена отражением от областей в зените. Впоследствии было показано, что радиолокатор через боковой лепесток антенны регистрировал частичное зеркальное отражение от плоской поверхности, образованной дугами и драпри полярных сияний, расположенных на севере близ горизонта.

В этих экспериментах была впервые обнаружена главная особенность радиосияний — «ракурсный эффект». Он состоит в том, что независимо от места расположения станции радиолокаторы регистрировали всегда отражение только под малыми углами к горизонту с дальностей 400—1100 км. В северном полушарии эти отражения регистрировались в северном квадранте, а в южном полушарии — в южном квадранте.

Проблема радиосияний распадается на два главных вопроса: 1) чем они вызываются и 2) каковы их основные закономерности и как они связаны с другими геофизическими явлениями — полярными сияниями, ионосферными токами и возмущением геомагнитного поля.

Первое объяснение радиосияний попытался дать С. Чепмен, который полагал, что они происходят от ионо-

сферных неоднородностей, которые вытянуты вдоль силовых линий геомагнитного поля. Вначале считалось, что последние непосредственно связаны с лучами полярных сияний.

В соответствии с рекомендацией шестой международной комиссии МАГА под радиоавророй (радиосияниями) в настоящее время «понимается специфический для полярных областей эффект, состоящий в том, что в полярной ионосфере во время магнитных возмущений возникают особые неоднородности электронной концентрации, которые способны интенсивно рассеивать радиоволны КВ, УКВ и СВЧ диапазонов. Особые свойства неоднородностей проявляются в том, что интенсивность рассеянного на них сигнала зависит от угла между нормалью к фронту падающей волны и вектором магнитного поля Земли в точке рассеяния».

Радиолокаторы, ведущие наблюдение за определенными объектами, получают информацию об этих объектах благодаря тому, что излученная локатором радиоволна отражается от этих объектов и попадает обратно в радиолокатор и регистрируется на индикаторе кругового обзора (ИКО) — фактически на экране электронно-лучевой трубки. Если же одновременно с этим полезным отраженным сигналом на экране будет регистрироваться и сигнал радиосияния, то он будет своего рода помехой, потому что разделить и различить их будет трудно.

Именно поэтому радиосияния оказались серьезной естественной помехой работе радиолокационных установок в высоких широтах. Из-за этих помех в ряде случаев нормальная работа РЛС может быть полностью нарушена. Станции обнаружения самолетов, имеющие высокую частоту следования зондирующих импульсов, на втором и последующих ходах развертки будут регистрировать помеху за счет радиосияния.

Особенно опасны радиосияния для станций обнаружения баллистических ракет, у которых диапазон рабочих дальностей перекрывает области радиосияний. Эти станции имеют настолько высокий потенциал, что для них оказываются существенными даже слабые радиосияния. Для того чтобы успешно бороться с этой естественной помехой, надо знать все ее свойства: в каких местах на земном шаре она появляется и как часто, в какое время суток, как зависит частота появления радиосияний от возмущенности геомагнитного поля и солнечной активности и др. Чтобы

ответить на эти вопросы, надо знать физические причины радиосияний.

В период Международного геофизического года (МГГ) — 1957—1958 гг. в северном полушарии работало 19 специальных радиолокационных станций, которые были расположены как севернее, так и южнее овала полярных сияний. Среди них были советские станции: Рощино, Лопарская, о-в Диксон, Тикси, Якутск, мыс Шмидта. Работа этой международной сети станций позволила получить большой материал, на основании анализа которого были определены главные свойства радиосияний.

В свое время было установлено, что рассеивание радиоволн происходит не в любом направлении. Радиосияния регистрируются лишь в том случае, когда луч радиолокатора приблизительно перпендикулярен к магнитной силовой линии на высоте 110 км. Это так называемый ракурсный эффект. Он вызывается тем, что авроральные неоднородности (вызывающие радиосияния) представляют собой анизотропные образования электронной концентрации, которые определенным образом ориентированы относительно магнитного поля Земли. Из-за ракурсного эффекта частота регистрации радиоэха существенным образом зависит от конкретных ракурсных условий в данной точке пространства.

Было найдено, что имеются два типа радиосияний: дискретный и диффузный. Дискретные радиосияния имеют вид четко выраженных и резко ограниченных по дальности областей с малой протяженностью. Они регистрируются от рассеивающих образований, вытянутых в вертикальном направлении. Толщина рассеивающей области составляет 10—25 км.

В случае диффузных радиосияний на экране ИКО радиолокатора изображение рассеивающей области выглядит в виде однородного пятна, которое перекрывает значительный диапазон дальностей. Огибающая отраженного сигнала на амплитудном индикаторе в случае диффузных отражений является плавной.

Диффузные радиосияния происходят от областей протяженных по высоте менее чем на 5 км, которые простираются над поверхностью Земли на несколько сот километров.

Радиоотражения в обоих случаях (дискретных и диффузных сияний) происходят на высотах 110 км. Это средняя высота возникновения авроральных неоднородностей.

Среднее квадратичное отклонение от этой величины составляет около 5 км.

Кроме указанных двух типов радиосияний, часто наблюдаются также смешанные типы отражений, которые представляют собой наложение диффузной и дискретной радиоавроры. При этом эффективная толщина их определяется большим размером, т. е. дискретной составляющей.

Для понимания физических причин, вызывающих радиосияния, важно установить их связь с другими геофизическими явлениями в этом районе, и прежде всего с сияниями в оптическом диапазоне длин волн.

Исследования этой связи проводились во многих работах и в некоторых случаях были получены противоречивые результаты. Дело в том, что в таких экспериментах имеются определенные трудности. Прежде всего они возникают из-за того, что сложно определить точно область радиосияния. Рассеяние радиоволн неоднородностями происходит на больших дальностях, тогда как радиолучи искривляются средой, в которой они распространяются за счет рефракции в ионосфере и атмосфере. Кроме того, радиоволны излучаются радиолокатором в пределах угла 50°, и поэтому рассеивающая область достаточно большая. Сияния в оптическом диапазоне измеряются фотометрами с углом около 5° и области того и другого сияния не перекрываются. Естественно, что ракурсный эффект накладывает определенные требования на геометрию этих экспериментов. Было зарегистрировано несколько случаев, когда радиосияния и оптические сияния располагались очень близко и даже частично совпадали.

В другом эксперименте (в 14 случаях) большинство радиоотражений располагались близко к узким дискретным оптическим сияниям. Точное положение последних определялось при помощи фотометрических параллаксов. Было установлено, что радиосияния тесно связаны в пространстве и во времени с оптическими сияниями в овале полярных сияний. Однако точное соответствие отсутствует.

В других экспериментах анализировались данные за двухлетний период наблюдений. Было найдено, что по крайней мере в 50% случаев существовала корреляция в пространстве и во времени между оптическими и радиосияниями. В вечернем и утреннем секторах радиоаврора как бы «окантовывает» дуги полярных сияний: утренние дуги окантовываются с приполюсной стороны, а вечерние — с экваториальной.

Наблюдения показали хорошую корреляцию между положением вторгающихся в верхнюю атмосферу электронов с положением радиосияний на ночной стороне. Потоки электронов измерялись приборами на ИСЗ. В дневные часы имелись случаи, когда вторжение электронов не сопровождалось радиосияниями.

Вторгающиеся протоны никогда не вызывали радиосияния.

Приведем основные результаты экспериментов, проведенных с июля по октябрь 1978 г. на антарктических высокоширотных станциях. Радиолокатор располагался на геомагнитной широте 72,3° и долготе 80,62°. Измерения оптического сияния в линии 4278 Å велись фотометром на удалении от радиолокатора в 270 км с таким расчетом, что область оптического свечения попадала в раскрыв антенны радиолокатора. При этом не вся область, которая могла формировать рассеянный радиосигнал, могла просматриваться фотометром, а только ее центральная часть на высоте 110 км. На этой высоте фотометр регистрировал свечение с пятна диаметром 10 км.

Одновременно с оптическими и радиосияниями анализировались и вариации геомагнитного поля.

Эти эксперименты показали, что в начальный период суббури усиливается интенсивность как оптического сияния, так и радиосияния. Колебания горизонтальной составляющей геомагнитного поля с периодами меньше 10 мин хорошо коррелируют с флуктуациями интенсивности радиосияний. При увеличении интенсивности радиосияний горизонтальная составляющая геомагнитного поля уменьшается.

В определенные часы мирового времени интенсивности оптического и радиосияний увеличиваются в разной мере, возможно, вследствие неполного перекрывания областей их возникновения. Такое объяснение может быть приемлемым, если интенсивность радиосияний возрастает намного больше, чем оптических. В обратном случае усиление оптического свечения вызывается усилением потоков заряженных частиц, а неоднородности, вызывающие радиосияния, создаются слабыми электрическими полями.

Эти эксперименты дали интересный результат. Оказалось, что интенсивность радиосияний хорошо коррелировала с интенсивностью оптического сияния до тех пор, пока дуги полярных сияний не достигали станции с фотометром. Когда дуги находились в зените и интенсивность оптиче-

ского свечения была максимальной, интенсивность радиосияния уменьшалась. Затем при дальнейшем движении дуг корреляция восстанавливалась. Это можно объяснить тем, что электрические поля и токи, связанные с дугами полярных сияний, внутри самих дуг уменьшаются.

Если при слабой активности радиосияния и оптические сияния в основном хорошо пространственно коррелируют, то при сильной активности эта корреляция часто нарушается, за исключением начальной фазы суббури.

Радиосияния вызываются анизотропными неоднородностями электронной концентрации в полярной ионосфере. Как возникают эти неоднородности?

Были проведены сопоставления областей возможного существования авроральных неоднородностей (вызывающих радиосияния), которые определялись по таковой системе с областями, где регистрировались радиосияния. Оказалось, что все основные типы радиосияний можно объяснить действием двухпотоковой и дрейфовоградиентной неустойчивости в ионосферной плазме. Эта точка зрения составляет основу большинства современных работ, в которых объясняются причины радиосияний.

ВМЕСТО ПОСЛЕСЛОВИЯ

О полярных сияниях в настоящее время мы знаем намного больше, чем полвека тому назад. Прямые измерения в космосе и околоземном космическом пространстве, которые последние десятилетия проводились с помощью ИСЗ и ракет, дали обширную информацию об окружающем нашу Землю пространстве, об условиях в межпланетной среде, о солнечной радиации как волновой (электромагнитное излучение различных диапазонов), так и корпускулярной, т. е. состоящей из электрически заряженных частиц.

Поэтому, располагая такой обширной информацией, мы можем сказать, что загадка полярных сияний, над которой бились многие за прошедшие столетия и тысячелетия, разгадана. Но не слишком ли самоуверенно это сказано? Проблема полярных сияний — это проблема солнечно-земной физики. Это значит, что она охватывает физико-химические процессы на Солнце, в околоземном космическом пространстве, в магнитосфере Земли. Поэтому, конечно, вся эта проблема не только не решена, но и очень далека от своего решения.

Загадка полярных сияний разгадана в том смысле, что сейчас нам достоверно известно, что они представляют собой свечение верхней атмосферы в высоких широтах северного и южного полушарий Земли, что это свечение вызывают заряженные частицы, приходящие к Земле от Солнца. Установлены и основные закономерности поведения полярных сияний (их зависимость от высоты, географического положения, геомагнитных координат, солнечной активности, возмущенности геомагнитного поля и т. д.). Но тем не менее остались нерешенными еще очень многие принципиальные вопросы. Физики считают, что явление изучено, если его можно описать количественно, формулами, которые выражают определенные физические законы. Если такое описание возможно, то представляется возможным предсказывать, прогнозировать протекание этого физического явления при различных влияющих на него факторах.

Проблема полярных сияний слишком многоплановая и сложная, чтобы мы могли в настоящее время похвастать количественным ее описанием. Если решение этой проблемы сравнить со строительством здания, то можно сказать, что в настоящее время имеются фундамент этого здания и почти построен каркас. Одновременно идет разработка (иногда весьма тщательная) отдельных вопросов — идут внутренние отделочные работы в некоторых помещениях здания. Но таких помещений еще мало. Очень мало! Во многих местах каркас совершенно голый, без стен. Мы, например, до сих пор не можем объяснить хотя бы грубо, как полярные сияния связаны с погодой. Через какие механизмы? Старожилы северяне знают, что северные сияния чаще наблюдаются в морозные ночи. Физики объяснить это не могут. Пока. Имеются некоторые данные о том, что когда Земля при движении по своей орбите вокруг Солнца входит в сектор с обратным направлением магнитного поля, количество облаков в атмосфере Земли резко увеличивается, погода меняется. Но тут мы стоим еще только у подножия проблемы.

В начале книги говорилось о том, что северные сияния, которые наблюдались на юге Европы и берегах Средиземного моря, связывались населяющими эти места народами с разного рода трагическими явлениями в природе и обществе.

Только ли страх бессильного человека перед могущественными неразгаданными силами природы отразился в этих верованиях. Что об этой связи можно сказать сейчас?

Прежде всего эта замеченная взаимосвязь говорит о хорошей наблюдательности древнего человека.

Ведь сейчас на большом статистическом материале установлено, что солнечные ритмы с различными периодами (27 суток, 11 лет и др.) сказываются буквально на всех уровнях организации жизни на Земле. Солнечные и магнитные бури (а значит, и полярные сияния) самым тесным образом связаны с разного рода заболеваниями, прежде всего сердечно-сосудистой системы.

С солнечными циклами различного периода (11- и 33-летние и т. д.) связаны крупномасштабные изменения климата на Земле, появление засух, осадки, землетрясения и др. Если при этом помнить, что различные эпидемии тесно связаны с циклами солнечной активности, то не так уж и наивно выглядят сообщения в летописях об огромных солнечных пятнах как предвестниках разного рода бедствий на Земле. Конечно, эти вопросы не входят в проблему полярных сияний. Их изучает наука гелиобиология. Но тем не менее очень важно видеть всю проблему в целом.

Овалы полярных сияний в северном и южном полушариях являются теми местами, через которые Космос оказывает самое эффективное воздействие на процессы на Земле. Вторжение заряженных частиц в эти овалы вызывают процессы в полярной атмосфере, которые сказываются на многих сторонах нашей жизни. В результате этого вторжения изменяется содержание озона, и электрический потенциал ионосферы, происходит нагрев ионосферной плазмы, что порождает планетарные волны. Все эти процессы самым непосредственным образом связаны с формированием погоды на Земле. Высыпание заряженных частиц в овалы полярных сияний вызывают электропроводность ионосферы, в результате чего на высотах около 100 км текут интенсивные электрические токи в десятки тысяч ампер. Эти токи изменяют магнитное поле Земли, что сказывается на состоянии здоровья людей. Таким образом, Космос через эти окна — овалы полярных сияний — действует на неживую и на живую природу. Поэтому изучение этого влияния является очень важной задачей. Хотя на сегодняшний день уже много сделано для ее решения, но предстоит сделать еще больше.

Человек живет на Земле многие тысячелетия. Но он еще очень мало знает о доме, в котором он обитает. Главные радости познания и открытий впереди.

Лучистая дуга полярного сияния. Фото Г. Чернова

Лучистая дуга с завитком. Фото Г. Чернова

Лучистая дуга с завитком. Фото Г. Чернова

Лучистая дуга полярного сияния. Фото Г. Чернова

Две лучистые полосы со складками. Фото Г. Чернова

Две лучистые полосы со складками. Фото Г. Чернова

Лучистая полоса — спираль. Фото Г. Чернова

Лучистая полоса—спираль. Фото Г. Чернова

В книге использованы иллюстрации из следующих источников.

Акасофу С. И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. М.: Мир, 1974 (рис. 1, 3, 4, 8, 9, 20, 21—25, 28, 31, 39, 40, 42).

Эллисон М. А. Солнце и его влияние на Землю. М.: Мир, 1959 (рис. 2).

Космическая физика. М.: Мир, 1969 (рис. 5).

Космическая геофизика. М.: Мир, 1976 (рис. 6).

Арцимович Л. А. Элементарная физика плазмы. М., 1963 (рис. 10—19).

Акасофу С. И. Магнитосферная суббуря. М.: Мир, 1976 (рис. 29, 30, 32—34, 48, 50—52).

Исаев С. И. Полярные сияния. Мурманск: Кн. изд-во, 1980 (рис. 26).

Омхольт А. Полярные сияния. М.: Мир, 1974 (рис. 27).

Ришбет Г., Гарриот О. К. Введение в физику ионосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975 (рис. 38, 41, 43—45).

Мизун Ю. Г. Полярная ионосфера. Л.: Наука, 1980 (рис. 47, 49).

СОДЕРЖАНИЕ

Мизун Юрий Гаврилович
ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Утверждено к печати Редколлегией
научно-популярной литературы
Академии наук СССР

Редактор издательства В. П. Большаков
Художественный редактор М. А. Драговой
Технический редактор Л. И. Куприянова
Корректоры Л. В. Лукичева, Л. Д. Собко

ИБ № 27388

Сдано в набор 3.03.83.
Подписано к печати 27.05.83.
Т-07666. Формат 84×108¹/₃₂.
Бумага типографская № 2
Гарнитура обыкновенная. Печать высокая
Усл. печ. л. 7,35. Уч.-изд. л. 7,8. Усл. кр. отт. 7,77.
Тираж 74000 экз. Тип. зак. 2627
Цена 45 коп.

Издательство «Наука» 117864 ГСП-7, Москва В-485
Профсоюзная ул., 90.

2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10